

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Adel El-Saleh**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Kalman Žiha, dipl. ing.

Student:

Adel El-Saleh

Zagreb, 2013.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu*

#### *Zahvala*

*Želio bih se posebno zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Kalmanu Žihi na razumijevanju, strpljivosti i korisnim savjetima koji su mi pomogli u trenucima kada sam nailazio na poteškoće tijekom izrade rada. Zahvalio bih se dr. sc. Jošku Parunovu na nekoliko korisnih savjeta koji su mi olakšali izradu rada.*

*Također bih se zahvalio svojoj obitelji, djevojci i najbližijim kolegama na neizmjernoj podršci i pomoći tijekom cjelokupnog studiranja.*

*Adel El-Saleh*

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	II
POPIS SLIKA.....	V
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA.....	XI
SAŽETAK.....	XVI
SUMMARY.....	XVII
1   Uvod.....	1
2   Mehanička svojstva materijala .....	2
2.1   Općenito o mehaničkim svojstvima materijala .....	2
2.2   Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala.....	3
2.3   Statički vlačni pokus.....	4
2.4   Ostala svojstva čelika važna za konstrukciju broskog trupa .....	12
2.5   Mehanička svojstva brodograđevnog čelika.....	14
2.5.1   Usporedba mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika .....	14
3   Granična čvrstoća broskog trupa.....	18
3.1   Teorija proračuna granične čvrstoće broskog trupa .....	18
3.1.1   Analiza izvijanja.....	18
3.1.2   Analiza plastičnih zglobova .....	18
3.1.3   Analiza granične čvrstoće individualnog elementa.....	19
3.1.4   Analiza granične čvrstoće modula trupa .....	20
3.2   Numeričko rješenje problema granične čvrstoće.....	23
3.2.1   Krivulje naprezanje – deformacija .....	23
3.3   Algoritam numeričkog rješenja .....	31

4	Usporedba granične čvrstoće na osnovi nominalnih i stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika na primjeru broda za rasute terete .....	34
4.1	Karakteristike poprečnog presjeka broda za rasute terete .....	35
4.2	Proračun granične čvrstoće na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika.....	41
4.3	Proračun granične čvrstoće na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika.....	44
4.4	Usporedba i analiza rezultata proračuna granične čvrstoće.....	47
5	Pouzdanost konstrukcije.....	49
5.1	Općenito o pouzdanosti .....	49
5.2	Metode pouzdanosti.....	50
5.3	Razine metoda pouzdanosti .....	51
5.4	Tipovi neizvjesnosti.....	52
5.5	Tehnike određivanja pouzdanosti .....	53
5.6	Racionalni pristup sigurnosti brodskih konstrukcija .....	55
5.6.1	Projektne varijable.....	55
5.6.2	Načini oštećenja brodskih konstrukcija.....	57
6	Sigurnost konstrukcija.....	59
6.1	Vjerojatnosni pristup .....	59
6.2	Poluvjerojatnosni pristup.....	60
6.3	Deterministički pristup .....	60
7	Proračun pouzdanosti konstrukcije broda za rasute terete .....	62
7.1	Proračun pouzdanosti na osnovi granične čvrstoće broskog trupa.....	64
7.2	Određivanje opterećenja za proračun pouzdanosti .....	67

7.2.1	Momenti savijanja na mirnoj vodi .....	68
7.2.2	Ograničavanja opterećenja na mirnoj vodi.....	69
7.2.3	Opterećenja na mirnoj vodi za više putovanja .....	69
7.2.4	Momenati savijanja na valovima.....	71
7.3	Proračun pouzdanosti za razmatrani brod .....	74
7.3.1	Ulazni podaci za cijeli životni vijek broda.....	74
7.3.2	Ulazni podaci za jednu godinu službe.....	75
7.4	Proračun pouzdanosti po FOSM postupku .....	76
7.4.1	Proračun pouzdanosti FOSM postupkom za 30 godina službe.....	77
7.4.2	Proračun pouzdanosti FOSM postupkom za jednu godinu službe.....	78
7.4.3	Pregled rezultata dobivenih FOSM postupkom .....	79
7.5	Proračun pouzdanosti po AFORM postupku.....	80
7.5.1	Proračun pouzdanosti AFORM postupkom za 30 godina službe .....	81
7.5.2	Proračun pouzdanosti AFORM postupkom za jednu godinu službe .....	82
7.5.3	Pregled rezultata dobivenih AFORM postupkom.....	83
7.6	Usporedba rezultata proračuna FOSM i AFORM postupcima .....	84
7.7	Parametarska analiza utjecaja svojstava ugrađenih materijala na pouzdanost brodskog trupa.....	85
7.7.1	Parametarska analiza za 30 godina službe .....	85
7.7.2	Parametarska analiza za jednu godinu službe .....	89
8	Zaključak.....	93
9	Literatura .....	94

## POPIS SLIKA

Slika 2-1	Dijagram „sila – produljenje“ .....	5
Slika 2-2	Dijagram „naprezanje – istežanje“ .....	7
Slika 2-3	Konvencionalna granica razvlačenja .....	8
Slika 2-4	Krivulje naprezanje-istežanje za obični brodograđevni čelik.....	10
Slika 2-5	Karakteristične veličine okrugle epruvete .....	12
Slika 2-6	Dinamička izdržljivost pokusima S-N krivulja (Wöhlerove krivulje) .....	14
Slika 3-1	Ovisnost momenta savijanja o zakrivljenosti trupa.....	21
Slika 3-2	Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za elasto - plastični način sloma.....	25
Slika 3-3	Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za slom putem gredno – štapnog izvijanja .....	27
Slika 3-4	Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za slom putem torzijskog izvijanja.....	28
Slika 3-5	Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa .....	30
Slika 3-6	Algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja .....	33
Slika 4-1	Geometrija glavnog rebra u programu MARS 2000 .....	36
Slika 4-2	Uzdužna čvrstoća broda na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000.....	42
Slika 4-3	Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa $M - \chi$ na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000.....	43
Slika 4-4	Uzdužna čvrstoća broda na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000.....	45
Slika 4-5	Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa $M - \chi$ na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000 .....	46
Slika 4-6	Zajednički dijagram momenata savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa $M - \chi$ na osnovi stvarnih i nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000.....	48

Slika 5-1	Funkcija graničnog stanja .....	58
Slika 7-1	Glavno rebro broda za prijevoz rasutog tereta.....	66
Slika 7-2	Raspodjela opterećenja uslijed momenata na mirnoj vodi za 1 i 6 putovanja.....	71
Slika 7-3	Dugoročni dinamički odzivi za veće brodove .....	72
Slika 7-4	Dugoročno predviđanje momenata savijanja za pregib i progib .....	73
Slika 7-5	Zajednički dijagram $\beta_{AFORM} - COV$ za FL, BL i FL+BL .....	88
Slika 7-6	Zajednički dijagram $p_f - COV$ za FL, BL i FL+BL .....	88
Slika 7-7	Zajednički dijagram $\beta_{AFORM} - COV$ za FL, BL i FL+BL .....	91
Slika 7-8	Zajednički dijagram $p_f - COV$ za FL, BL i FL+BL .....	92



## POPIS TABLICA

Tablica 2-1	Preporučene dimenzije epruveta prema Hrvatskom registru brodova.....	12
Tablica 2-2	Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti za obični brodograđevni čelik ....	15
Tablica 2-3	Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti čelika AH 32 .....	16
Tablica 2-4	Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti za čelik AH 36.....	17
Tablica 2-5	Usporedba odstupanja vrijednosti stvarnih mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika u odnosu na nominalne vrijednosti .....	17
Tablica 4-1	Glavne karakteristike broda .....	34
Tablica 4-2	Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m <sup>2</sup> ] .....	37
Tablica 4-3	Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m <sup>2</sup> ].....	37
Tablica 4-4	Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (bruto izmjere).....	37
Tablica 4-5	Profili .....	38
Tablica 4-6	Vojevi.....	38
Tablica 4-7	Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m <sup>2</sup> ].....	38
Tablica 4-8	Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m <sup>2</sup> ] .....	39
Tablica 4-9	Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (neto izmjere) .....	39
Tablica 4-10	Usporedbena tablica momenata otpora i inercije za čelike nominalnih i stvarnih svojstava.....	40
Tablica 4-11	Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000 .....	41
Tablica 4-12	Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000.....	43
Tablica 4-13	Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000 .....	44

Tablica 4-14	Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000 .....	46
Tablica 4-15	Usporedba rezultata proračuna na temelju nominalnih i stvarnih mehaničkih svojstava materijala - MARS 2000 .....	47
Tablica 7-1	Glavne karakteristike broda .....	65
Tablica 7-2	Predviđeni radni profil za brod za rasute terete iz ovog zadatka .....	67
Tablica 7-3	Broj putovanja u jednoj godini prihvaćen za razmatrani brod za rasute terete..	67
Tablica 7-4	Statistička svojstva momenata savijanja brodova za rasute terete na mirnoj vodi za jedno putovanje prema najvećim dozvoljenim vrijednostima .....	68
Tablica 7-5	Izračunata statistička svojstva momenata savijanja na mirnoj vodi prema najvećim dozvoljenim vrijednostima za jedno putovanje .....	68
Tablica 7-6	Opterećenja na mirnoj vodi prema dozvoljenim opterećenjima za jedno i šest putovanja - progib .....	70
Tablica 7-7	Opterećenja na mirnoj vodi prema dozvoljenim opterećenjima za jedno i šest putovanja - pregib.....	70
Tablica 7-8	Statistička svojstva momenata savijanja brodova za rasute terete na mirnoj vodi prema najvećim dozvoljenim vrijednostima za 1 i 6 putovanja - progib .....	70
Tablica 7-9	Statistička svojstva momenata savijanja brodova za rasute terete na mirnoj vodi prema najvećim dozvoljenim vrijednostima za 1 i 6 putovanja - pregib .....	71
Tablica 7-10	Opterećenja na valovima za stanja pregiba i progiba broskog trupa na osnovi zajedničkih pravila IACS- a za brodove za rasute terete za 30 godina službe.....	72
Tablica 7-11	Opterećenja na valovima za stanja pregiba i progiba broskog trupa na osnovi zajedničkih pravila IACS- a za brodove za rasute terete za 1 godinu službe.....	73
Tablica 7-12	Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za BL (pregib) - 30 godina službe ....	74
Tablica 7-13	Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za FL (progib) - 30 godina službe ....	74
Tablica 7-14	Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za BL (pregib) - 1 godina službe .....	75

Tablica 7-15	Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za FL (progib) - 1 godina službe .....	75
Tablica 7-16	Izračunati podaci za BL (pregib) potrebni za $\beta_{FOSM}$ - 30 godina službe.....	77
Tablica 7-17	Izračunati podaci za FL (progib) potrebni za $\beta_{FOSM}$ - 30 godina službe.....	77
Tablica 7-18	Izračunati podaci za BL (pregib) potrebni za $\beta_{FOSM}$ - 1 godina službe .....	78
Tablica 7-19	Izračunati podaci za FL (progib) potrebni za $\beta_{FOSM}$ - 1 godina službe.....	78
Tablica 7-20	Transformacija varijabli za BL (pregib) brodskog trupa - 30 godina službe...	81
Tablica 7-21	Transformacija varijabli za FL (progib) brodskog trupa - 30 godina službe...	81
Tablica 7-22	Transformacija varijabli za BL (pregib) brodskog trupa - 1 godina službe.....	82
Tablica 7-23	Transformacija varijabli za FL i progib brodskog trupa - 1 godina službe .....	82
Tablica 7-24	Usporedba rezultata proračuna indeksa sigurnosti i vjerojatnosti oštećenja za FL i BL; za 30 godina i za 1 godinu službe .....	84
Tablica 7-25	Rezultati za BL na temelju $\chi_u=1.14$ - nominalni materijal; 30 godina .....	85
Tablica 7-26	Rezultati za FL na temelju $\chi_u=1.14$ - nominalni materijal; 30 godina.....	85
Tablica 7-27	Rezultati za BL na temelju $\chi_u=1.10$ - stvarni materijal; 30 godina.....	86
Tablica 7-28	Rezultati za FL na temelju $\chi_u=1.10$ - stvarni materijal; 30 godina .....	86
Tablica 7-29	Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju $\chi_u=1.14$ - nominalni materijal.....	87
Tablica 7-30	Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju $\chi_u=1.10$ - stvarni materijal.....	87
Tablica 7-31	Rezultati za BL na temelju $\chi_u=1.14$ - nominalni materijal; 1 godina .....	89
Tablica 7-32	Rezultati za FL na temelju $\chi_u=1.14$ - nominalni materijal; 1 godina.....	89
Tablica 7-33	Rezultati za BL na temelju $\chi_u=1.10$ - stvarni materijal; 1 godina.....	89
Tablica 7-34	Rezultati za FL na temelju $\chi_u=1.10$ - stvarni materijal; 1 godina .....	90

Tablica 7-35 Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju $\chi_u=1.14$ - nominalni materijal.....	90
Tablica 7-36 Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju $\chi_u=1.10$ - stvarni materijal.....	90

## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

$\tau_{th}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Teoretsko smično naprezanje
$\tau_{stv}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Eksperimentalno smično naprezanje
E	[N/mm <sup>2</sup> ]	Modul elastičnosti
$R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Konvencionalna granica razvlačenja s plastičnom deformacijom od 0,2%
$R_{p0,01}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Konvencionalna granica razvlačenja s plastičnom deformacijom od 0,01%
$R_e$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Granica razvlačenja
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Rastezna ili vlačna čvrstoća materijala
I	[%]	Istezljivost materijala; postotna deformacija nakon kidanja
A	[mm <sup>2</sup> ]	Površina poprečnog presjeka elementa
$R_e^h$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Minimalna nominalna granica razvlačenja materijala
$F_e$	[N]	Sila razvlačenja ili tečenja
$F_m$	[N]	Maksimalna sila
$F_k$	[N]	Konačna sila pri kojoj dolazi do loma epruvete
$R_k$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Konačno naprezanje
$\Delta L$	[mm]	Produljenje
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Naprezanje
$\varepsilon$	[mm/mm]	Nominalno ili inženjersko istezanje
$\varepsilon_u$	[mm/mm]	Istezanje nakon kidanja
$\varepsilon_m$	[mm/mm]	Neproporcionalna postotna deformacija pri najvećem opterećenju
l	[mm]	Ukupna duljina epruvete

$d_0$	[mm]	Promjer vrata epruvete
$d_1$	[mm]	Promjer glave epruvete
$H$	[mm]	Duljina glave epruvete
$L_0$	[mm]	Početna mjerna duljina epruvete
$L_c$	[mm]	Duljina ispitnog dijela epruvete; duljina uskog paralelnog dijela epruvete
$L_u$	[mm]	Konačna mjerna duljina epruvete
$A_0, S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Početna površina presjeka epruvete
$\sigma_t$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Stvarno ili aktualno naprezanje
$A_t$	[mm <sup>2</sup> ]	Akualna površina poprečnog presjeka
$A_u$	[mm <sup>2</sup> ]	Konačna površina poprečnog presjeka
$\nu$		Poissonov omjer
$\epsilon_{trans}$		Poprečno (transverzalno) suženje ili skupljanje
$\epsilon_{axial}$		Uzdužno (aksijalno) produljenje
$M$	[Nm]	Moment savijanja
$M_u$	[Nm]	Moment sloma broskog trupa
$\Delta\chi$		Inkrement zakrivljenosti grede
$M_b$	[Nm]	Ukupni projektni moment
$M_{CR}$	[Nm]	Kritični moment savijanja elastičnosti
$M_P$	[Nm]	Moment savijanja potpune plastičnosti
$M_{SW}$	[Nm]	Projektni moment savijanja na mirnoj vodi
$M_U, M_{ULT}$	[Nm]	Granični moment savijanja

$M_w$	[Nm]	Projektni moment savijanja od valova
$z$	[m]	Vertikalna koordinata
$\Phi$		Granična funkcija
$\sigma_c$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kritčno naprezanje
$\sigma_{cp}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja
$\sigma_e$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Euleroovo naprezanje štapnog izvijanja
$I_E$	[cm <sup>4</sup> ]	Moment tromosti poprečnog presjeka ukrepe s pridruženom oplatom
$I$	[m <sup>4</sup> ; cm <sup>4</sup> ]	Moment tromosti poprečnog presjeka
$I_p$	[cm <sup>4</sup> ]	Polarni moment tromosti poprečnog presjeka
$A_E$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina poprečnog presjeka ukrepe s pridruženom oplatom
$A_S$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina presjeka struka uzdužnjaka
$b_E$	[m]	Širina pridružene oplata
$h_w$	[mm]	Visina struka ukrepe
$h_{wE}$	[mm]	Efektivna visina struka
$R$	[m]	Radijus zakrivljenosti
$Q$	[N]	Poprečna sila
$q, q_U, q_T$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Opterećenje
$s$	[m]	Razmak uzdužnjaka; razmak rebara
$t$	[mm]	Debljina opločenja
$t_p$	[mm]	Debljina pridružene oplata
$t_w$	[mm]	Debljina struka

$W$	$[m^3]$	Moment otpora poprečnog presjeka
$\beta_E$		Koeficijent izvijanja
$\gamma$		Faktor sigurnosti
$\varepsilon_Y$		Deformacija popuštanja
$D$		Zahtjev (opterećenje) na konstrukciju
$C$		Izdržljivost konstrukcije
$g(C,D)$		funkcija graničnog stanja
$E$		Elementarni događaj
$P$		Vjerojatnost nastupanja
$p_f$		Vjerojatnost oštećenja
$R$		Pouzdanost
$f$		Faktor sigurnosti
$f_n$		Normalizirani faktor sigurnosti
$m$		Razlika sigurnosti; margina sigurnosti
$m_n$		Normalizirana razlika sigurnosti; normalizirana margina sigurnosti
$i$		Iskoristivost izdržljivosti
$E,\mu$		Srednja vrijednost; očekivanje
$\sigma^2$		Varijanca
$\sigma$		Standardna devijacija
$\beta_C$		Cornellov indeks sigurnosti
$\beta_{FOSM}$		Indeks sigurnosti prema FOSM postupku



$\beta_{\text{AFORM}}$	Indeks sigurnost prema AFORM postupku
$\chi_u, \chi_w, \chi_{nl}$	Slučajne varijable koje predstavljaju neizvjesnosti
$\psi$	Zajednički faktor kombinacije opterećenja na mirnoj vodi i valovima
COV	Koeficijent varijacije
$m, \beta$	Parametri Gumbelove distribucije
N	Broj susreta s valovima
Q	Vjerojatnost premašivanja odziva/opterećenja
$R_Q$	Dinamički odziv za zadanu razinu vjerojatnosti premašivanja Q
$C_w$	Valni koeficijent

## SAŽETAK

Motivacija za ovaj rad je pronađena u spoznaji da se mehanička svojstva stvarno ugrađenog čelika u trup izgrađenog broda mogu razlikovati od nominalnih koja se koriste u projektnom postupku. Cilj ovog rada je utvrditi utjecaje stvarnih svojstava ugrađenih materijala na graničnu čvrstoću i pouzdanost proračuna granične čvrstoće izgrađenih brodova.

Stoga se na početku ovog rada daju rezultati ispitivanja stvarnih svojstava brodograđevnog čelika povišene čvrstoće koja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku na uzorcima iz brodogradilišta za određeni brod.

U nastavku rada je proveden proračun s nominalnim vrijednostima mehaničkih svojstava čelika povišene čvrstoće, a onda i s eksperimentalno utvrđenim vrijednostima korištenjem programa MARS 2000 u cilju utvrđivanja utjecaja materijala na graničnu čvrstoću broda; na primjeru broda za rasute terete izgrađenog u Hrvatskoj.

Nadalje, u radu je provedena analiza pouzdanosti s ciljem utvrđivanja utjecaja materijala na mjere pouzdanosti. Najprije su utvrđena statistička svojstva opterećenja na mirnoj vodi i na valovima korištenjem podataka iz knjige krcanja i zajedničkih pravila IACS-a za brodove za rasute terete za primjer broda u ovome radu. Korištene su pojednostavljene i napredne metode proračuna pouzdanosti brodskog trupa. Pojednostavljeni i napredni postupci proračuna pouzdanosti su provedeni u MS-Office Excel tabličnom programu.

Na kraju se daje usporedbeni pregled rezultata proračuna pouzdanosti na osnovi jednogodišnje službe broda i za cijeli životni vijek od 30 godina u neograničenim uvjetima i to na osnovi projektnog pristupa s općim podacima o statističkim svojstvima materijala i pristupa sa stvarnim izmjerenim podacima ugrađenih materijala u izgrađeni brod.

Ključne riječi: mehanička svojstva materijala, statistička svojstva opterećenja, služba broda, uzdužna i granična čvrstoća broda, pouzdanost brodskog trupa

## SUMMARY

The motivation for this work was in the experience that the in-built material properties of ships as-built can differ significantly of the material characteristics used in the design phase. The scope of this work is to determine the effects of in-built material properties on the limit strength and reliability of ship as-built.

Therefore the work firstly presents the results of testing of higher tensile steels in the Laboratory for experimental mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

In the continuation of the work, limit strength of the example ship was determined firstly with the nominal material properties and then with experimentally obtained results by using the appropriate computer program MARS 2000.

Next, the reliability analysis of the example ship is performed in order to find out the effects of material properties on the reliability calculations. Firstly, the statistical properties of still water and wave bending moments are defined based on Common Structural Rules (CSR) for bulk carriers from IACS. Approximate and advanced reliability calculations are performed in MS Office Excel spreadsheets calculation program.

At the end, the comparative overview of the results of the reliability analysis is presented for one year and lifetime ship operations in unrestricted conditions both for nominal data used in the design process and for experimental data of materials collected in the shipyard in building phase.

Key words: materials mechanical properties, statistical characteristics of loads, ship service, longitudinal strength, limit strength, reliability of the ship hull

# 1 Uvod

Usprkos velikom napretku u ostvarivanju sigurnosti brodskih konstrukcija ipak se bilježe određeni gubici brodova zbog oštećivanja trupa. Od 1980. do sredine 1990 - ih godina preko 150 brodova za rasute terete se smatralo izgubljenima, s više od 1200 izgubljenih života. Ovi pokazatelji su ponovno skrenuli pažnju brodograđevne zajednice na stalnu potrebu istraživanja brodskih konstrukcija u službi broda. Interes brodograđevne zajednice se od projektirane čvrstoće broskog trupa okrenuo prema njegovoj graničnoj čvrstoći. Zahvaljujući prije razvijanim metodama za određivanje pouzdanosti brodskih konstrukcija i granične čvrstoće, daljnja istraživanja se nastavljaju u kombinaciji proračuna pouzdanosti i granične čvrstoće. U ovom radu će se posebna pažnja posvetiti utjecaju svojstava ugrađenih materijala na graničnu čvrstoću izgrađenih brodova za razliku od procjene granične čvrstoće na osnovi projektnih (nominalnih) podataka o materijalu.

Većina osnovnih svojstava broda se određuje u pred-projektnoj i projektnoj fazi. Neka se od tih svojstava međutim mijenjaju u raznim fazama životnog vijeka broda, tijekom projektiranja, gradnje, kontrole kvalitete i službe. Neka se osnovna projektna svojstva broda, kao što su geometrija, nosivost, stabilitet i brzina, provjeravaju i utvrđuju kao svojstva izgrađenog broda. Međutim, to najčešće nije slučaj s vrlo bitnim svojstvima ugrađenih materijala, te čvrstoćom i pouzdanošću izgrađenog broda koji se u cijelom životnom vijeku broda tretiraju kao projektne veličine jednake nominalnim svojstvima kako se propisuje za minimalne uvjete prihvatljivosti od proizvođača.

Određivanje lokalne i globalne čvrstoće broskog trupa, kao i uzdužne i granične čvrstoće te procjena životnog vijeka prema pravilima i direktnim proračunima su normalno dio projektne procedure da se osigura dovoljna čvrstoća broskog trupa i rijetko se provjeravaju nakon isporuke gotovih brodova.

Provjera svojstava ugrađenih materijala, čvrstoće i pouzdanosti broskog trupa se iznimno traži u slučajevima uočenih strukturnih problema na pokusnim vožnjama ili u službi.

Na osnovi mnogih opažanja, svojstva ugrađenih materijala se mogu znatno razlikovati od projektnih vrijednosti, a posljedica toga je razlika između čvrstoće izgrađenih brodova u odnosu na njihovu projektiranu čvrstoću. Ova pojava može utjecati na uvjete korištenja i nadzora.

## 2 Mehanička svojstva materijala

### 2.1 Općenito o mehaničkim svojstvima materijala

Eksploatacijske karakteristike nekog proizvoda su pored cijene njegove izrade, te trajnosti, osnovni pokazatelj uspješnosti proizvoda na tržištu.

Osnovna grupa svojstava koja zajedno s nekim ostalim svojstvima čine eksploatacijska svojstva su mehanička svojstva proizvoda odnosno mehanička svojstva materijala od kojih je načinjen. Prilikom kreiranja proizvoda pri izboru materijala posebno mjesto zauzima skupina mehaničkih svojstava koja treba sagledavati ne samo s gledišta eksploatacije tijekom cijelog životnog vijeka nego i s gledišta izradbe proizvoda.

Svojstva materijala općenito, pa tako i mehanička svojstva isključivo su posljedica strukturnog stanja materijala.

Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupcima. Tako se izborom određenog materijala i odgovarajućeg tehnološkog procesa postiže ciljano strukturno stanje koje će dati željena svojstva pa tako i mehanička svojstva.

Poznavanjem korelacije strukturno stanje - mehanička svojstva moguće je unaprijed proračunati mehanička svojstva. To, nažalost, vrijedi samo za idealnu tvar. Naime, u realnom materijalu prisutne su različite nepravilnosti u strukturi koje onemogućavaju takav proračun. Nepravilnosti kristalne građe, nulte, prve, druge i treće dimenzije bitno utječu na smanjenje mehaničkih svojstava realnog materijala u odnosu na idealnu tvar. Tako, na primjer teoretsko smično naprezanje potrebno za posmicanje kristalnih ravnina kod idealnog kristala  $\alpha$ -Fe iznosi :

$$\tau_{th} \approx 8400 \text{ N/mm}^2$$

dok ta vrijednost eksperimentalno utvđena iznosi :

$$\tau_{stv} \approx 10 \text{ N/mm}^2.$$

Razlog tako velikom smanjenju u odnosu na teoretsku veličinu su prvenstveno prisutne dislokacije u rešetci željeznih kristala.

Zbog svih nepravilnosti prisutnih kod realnih materijala, koje je nemoguće obuhvatiti proračunom, mehanička se svojstva mogu utvrditi isključivo eksperimentalnim putem. Zbog

toga je na području ispitivanja mehaničkih svojstava materijala razvijena različita laboratorijska oprema. Naime, pri takvim ispitivanjima često se nastoje imitirati uvjeti u kakvima će određeni materijal biti opterećen tokom eksploatacije. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala provodi se na posebno pripremljenim uzorcima koji se nazivaju "epruvete" ili "ispitni uzorci", ali isto tako i na gotovim strojnim elementima ili čak sklopovima. U skladu s mogućim načinom opterećivanja tokom eksploatacije i epruvete se opterećuju na vlak, tlak, savijanje, uvijanje i smik. Nadalje, opterećenje može biti statičko - konstantno opterećenje tokom vremena ili mali prirast opterećenja u jedinici vremena, odnosno dinamičko ukoliko se njegov intenzitet mijenja tokom vremena. Ta promjena je najčešće periodičkog karaktera. Često se prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava simuliraju i neki drugi eksploatacijski uvjeti kao npr. povišena ili snižena temperatura, agresivna atmosfera i sl. Osnovna mehanička svojstva određuju se na epruvetama napregnutim na vlak u uvjetima statičkog opterećenja. Takvo ispitivanje se naziva statički vlačni pokus [1].

## 2.2 Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Ona su, kao i sva ostala svojstva materijala, posljedica strukturnog stanja materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom.

Zbog važnosti mehaničkih svojstava za sigurnost brodova u službi o njima se posebno brinu klasifikacijska društva u svojim propisima o gradnji trupa.

Najvažniji pojmovi koji se koriste kod ispitivanja mehaničkih svojstava materijala su:

Uzorak – proizvod (npr. limovi ili cijevi) odabrani za određene ispitne količine ili ispitne skupine, sa svrhom da se iz njega izrade epruvete za ispitivanje.

Ispitna količina / ispitna skupina – dio isporučene količine na koju se odnose rezultati ispitivanja. Pojam se može primjeniti npr. na specifični broj proizvoda istih dimenzija, proizvoda različitih dimenzija proizvedenih od jedne taline, ili valjane duljine materijala.

Epruveta za ispitivanje – komad uzet iz uzorka za ispitivanje, koji u obrađenom ili neobrađenom stanju ima propisane dimenzije koji podliježe propisanom ispitivanju.

Svi proizvodi podliježu ispitivanju rastezanjem. Kod limova, toplo valjanih traka i širokih traka širine  $\geq 600\text{mm}$  epruvete se uzimaju poprečno na smjer valjanja. Za sve ostale vrste proizvoda epruvete se mogu uzimati poprečno na smjer, ili paralelno sa smjerom valjanja.

Broj epruveta određuje se prema kriterijima kao što su:

- a) Limovi i ploče: jedna epruveta s jednog kraja od svake valjane duljine. Ako je valjana duljina dulja od 7 m, uzima se po jedna epruveta s oba kraja.
- b) Limovi odrezani od toplo valjanih širokih traka, koji se ne podvrgavaju pojedinačnoj toplinskoj obradi: po jedna epruveta od svakog vanjskog i unutarnjeg kraja koluta i od polovine traka.
- c) Svi ostali proizvodi: jedna epruveta po ispitnoj skupini, koja ne smije biti teža od 15 t.

U tom slučaju ispitna skupina se smatra skupom proizvoda istog oblika, kojoj razlika u debljini ne smije biti veća od 5 mm, koji su proizvedeni od iste taline i koji se toplinski obrađuju u istom proizvodnom ciklusu.

Rastezna čvrstoća kod epruveta uzetih od krajeva „glave“ i „pete“ valjanog lima ne smije se nakon ispitivanja razlikovati za više od:

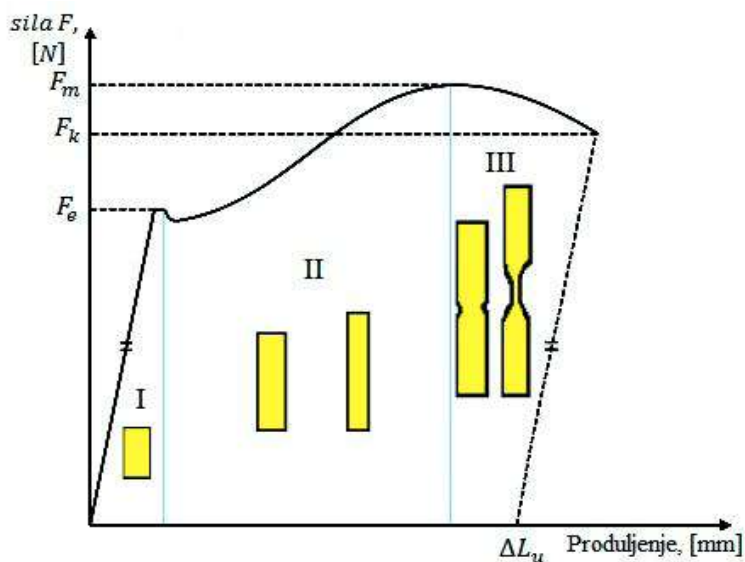
- Za valjane duljine  $\leq 10\text{ m}$ :  $60\text{ N/mm}^2$
- Za valjane duljine  $\geq 10\text{ m}$ :  $70\text{ N/mm}^2$

Uzorci za ispitivanje moraju biti odrezani na točno određenim mjestima te se mogu uzeti samo nakon završetka svih mehaničkih i/ili toplinskih obrada koje se primjenjuju na proizvod prije isporuke. Ako su uzorci uzeti iz materijala plinskim rezanjem ili odsjecanjem, potrebno je predvidjeti odgovarajući rub, koji se mora odstraniti prilikom završne obrade. Ako u izuzetnim slučajevima uzorci za ispitivanje ne mogu ostati pripojeni uz proizvod do kraja tehnološkog procesa proizvodnje, npr. ako se proizvodi obrađuju na završnoj dimenziji prije žarenja, onda oni moraju biti podvrgnuti istim mehaničkim i toplinskim obradama kao i proizvod.

## 2.3 Statički vlačni pokus

Elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja ispituje se statičkim vlačnim pokusom.

Ovim ispitivanjem utvrđuju se ujedno osnovna mehanička svojstva materijala, kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, itd. Ispitivanje se provodi na uređajima koji se nazivaju kidalice ili univerzalne ispitivalice, na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Opterećenje se kod kidalice ostvaruje hidraulički ili mehanički. Za preciznije mjerenje produljenja (npr. utvrđivanje  $R_{p0,01}$  ili modula elastičnosti) na epruvete se učvršćuju ekstenzometri koji rade na mehaničkom, optičkom ili elektronskom principu. Statički vlačni pokus se provodi, ovisno o obliku poluproizvoda, odnosno debljini stijenke, s epruvetama okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Ovim ispitivanjem mehaničkih svojstava koja karakteriziraju čvrstoću materijala utvrđuju se i neka svojstva kojima se opisuje deformabilnost materijala. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete, te se na pisaču kidalice za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram „sila – produljenje“ prikazan na Slici 2-1 iz kojeg se kasnije određuje dijagram *naprezanje – istezanje*.



**Slika 2-1** Dijagram „sila – produljenje“

U prvom dijelu dijagrama „sila – produljenje“, odnos sile i produljenja je linearan te takva linearna ovisnost vrijedi sve do dostizanja  $F_e$  – sile razvlačenja ili tečenja. Nakon dostizanja te sile epruveta se nastavlja produljivati uz mali pad sile. Za daljnje rastezanje materijala potrebno je opet povećanje sile. U tom dijelu statičkog vlačnog pokusa više ne postoji linearna ovisnost između prirasta sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostignuća  $F_m$  – maksimalne sile, nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz smanjenje potrebne sile zbog lokaliziranog intenzivnog smanjenja površine poprečnog presjeka. Konačno, pri vrijednosti  $F_k$  – konačne sile, dolazi do loma epruvete. Sastavi li se puknuta



epruveta te izmjeri razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio  $L_0$  (početna mjerna duljina), dobiva se konačna mjerna duljina  $L_u$ , te produljenje koje iznosi:

$$\Delta L = L_u - L_0$$

Iznos sila pri statičkom vlačnom pokusu ne daje pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir površina poprečnog presjeka epruvete, odnosno ukoliko se umjesto sile  $F$  ne uvede naprezanje  $\sigma$ , koje se određuje izrazom:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

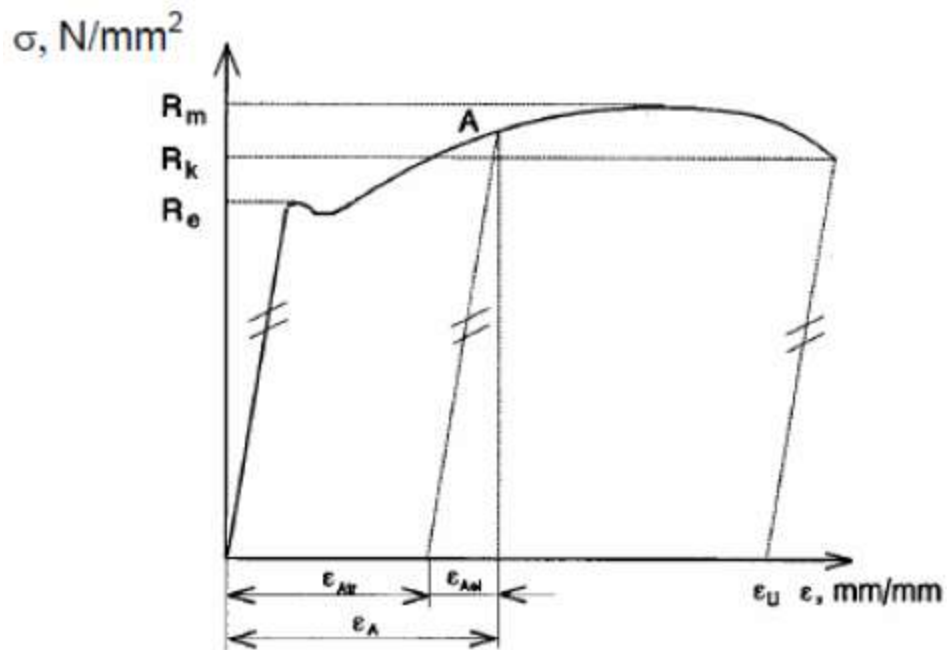
Ukoliko se produljenje  $\Delta L$  podijeli s početnom mjernom duljinom  $L_0$ , dobiva se relativno produljenje ili istezanje  $\varepsilon$  prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Istezanje se može izraziti u postocima:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

Na taj način se iz dijagrama „sila – produljenje“ dobiva dijagram „naprezanje – istezanje“ ( $\sigma - \varepsilon$ ), koji je za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju prikazan na Slici 2-2.



**Slika 2-2      Dijagram „naprezanje – istezanje“**

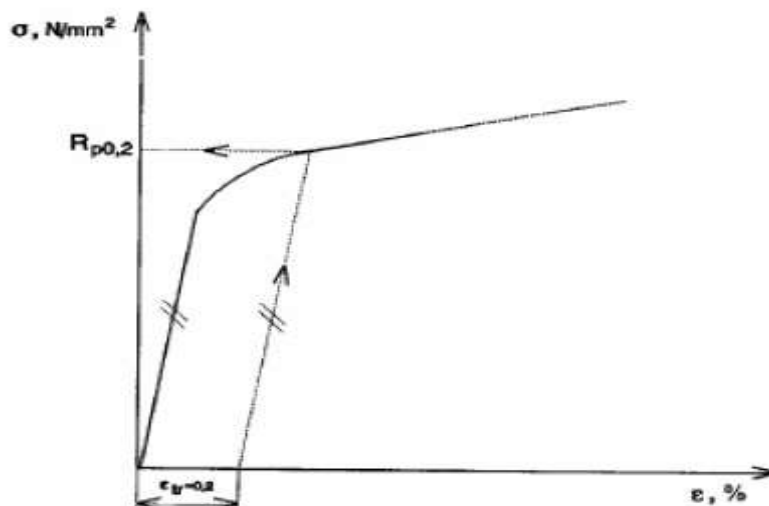
Dijagram ( $\sigma - \epsilon$ ) je kvalitativno jednak dijagramu  $F - \Delta L$  budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću ( $S_0$ ), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću  $L_0$ . Zbog toga i dijagram ( $\sigma - \epsilon$ ) počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hooke - ovim pravcem. U tom području naprezanja materijal je deformiran isključivo elastično što znači da u slučaju rasterećenja ( $\sigma = 0$ ) trajna deformacija je jednaka nuli, odnosno razmak mjernih točaka na epruveti jednak je  $L_0$ . Nakon što naprezanje u materijalu dostigne vrijednosti  $R_e$  – granica razvlačenja, nastupa tečenje bez povećanja naprezanja. Granica razvlačenja je po definiciji jednaka:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Granica razvlačenja jest ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja.

Naprezanja veća od granice razvlačenja  $R_e$  izazivaju osim elastične i plastičnu (trajnu) deformaciju epruvete. Pri naprezanju  $\sigma_a$  – ukupno istezanje iznosi  $\epsilon_a$ . Nakon rasterećenja elastično naprezanje  $\epsilon_{ael}$  isčezava, a ostaje plastično ili trajno naprezanje  $\epsilon_{apl}$ .

Kod materijala koji imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja. To je ono naprezanje koje će nakon rasterećenja ostaviti u materijalu određenu plastičnu deformaciju (Slika 2-3).



**Slika 2-3 Konvencionalna granica razvlačenja**

Kod konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,01}$ , u materijalu nakon rasterećenja ostaje plastična deformacija od 0,01%, dok kod konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$ , plastična deformacija iznosi 0,2%. Za razliku od standardnog statičkog vlačnog postupka za određivanje  $R_{p0,2}$  potreban je dodatni uređaj – ekstenzometar (precizni mjerac produljenja) koji se učvršćuje na epruvetu te za pojedine vrijednosti sile  $F$  mjeri produljenje  $\Delta L$ . Na osnovu izračunatih vrijednosti  $\sigma$  i  $\epsilon$  (izražen u %) grafički se određuje  $R_{p0,2}$ . Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća  $R_m$  i jednaka je omjeru maksimalne sile i površine poprečnog presjeka:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Nakon dostignutog naprezanja  $R_m$  deformacija epruvete nije jednolika po čitavom ispitnom dijelu, već se lokalizira na jednom mjestu. Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se konačno naprezanje  $R_k$  koje je jednako:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}$$

Vrijednost istezanja nakon kidanja, određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

Ukoliko se vrijednost  $\varepsilon_u$  izrazi u postocima naziva se istezljivost materijala I, te je definirana izrazom:

$$I = \varepsilon_u \cdot 100$$

Linearni dio dijagrama ( $\sigma - \varepsilon$ ), koji je karakteriziran izrazom:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Naziva se „Hooke – ovim zakonom“ i vrijedi samo u elastičnom području.

Konstanta E se naziva modulom elastičnosti ili Young – ovim modulom te predstavlja svojstvo materijala ovisno direktno o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetci ili amorfnoj strukturi. Što je ta veza jača veći je i modul elastičnosti. Zbog toga najveći modul elastičnosti ima dijamantna struktura. „Hooke – ov zakon“ se može napisati i na drugi način izrazom [1]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Iznos modula elastičnosti čelika je  $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$ .

Nominalno ili inženjersko naprezanje  $\sigma$  predstavlja omjer opterećenja F i ishodnog poprečnog presjeka  $A_0$ , ako se naprezanje raspodjeljuje jednoliko preko površine poprečnog presjeka:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}.$$

Stvarno ili aktualno naprezanje  $\sigma_t$  predstavlja omjer opterećenja F, kod bilo kojeg stupnja opterećenja i aktualne površine poprečnog presjeka kod tog stupnja opterećenja ( $A_t$ ):

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t}$$

Nominalno ili inženjersko istezanje  $\varepsilon$ , izražava se kao promjena duljine ( $L_u - L_0$ ) podijeljena s inicijalnom duljinom ( $L_0$ ):

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

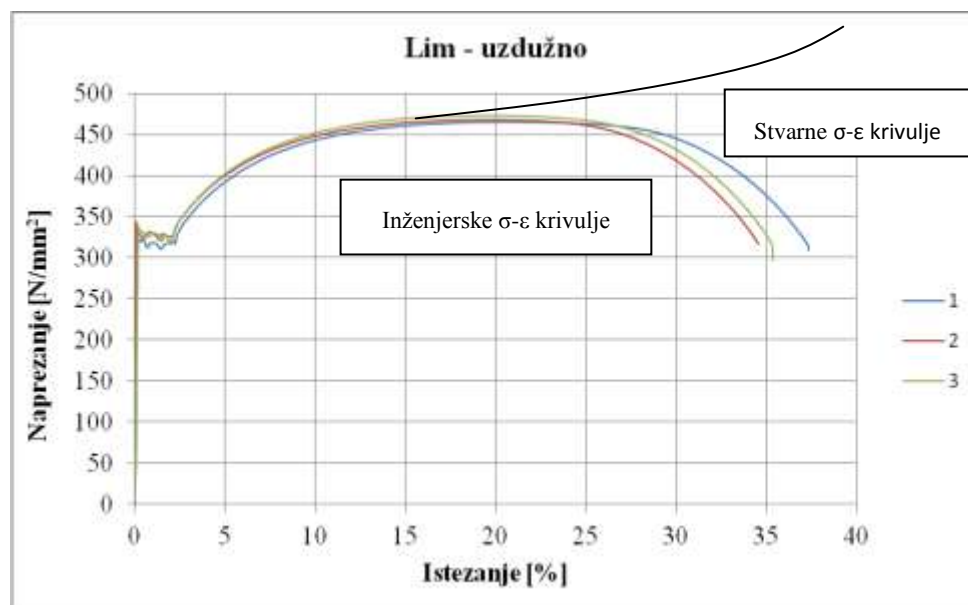
Stvarno ili efektivno istezanje  $\varepsilon_t$  predstavlja zbroj porasta istezanja podijeljen s aktualnom duljinom (prirodni logaritam konačne duljine podijeljen s inicijalnom duljinom):

$$\varepsilon_t = \int_{l_0}^{l_t} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_u}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

Ako nema promjene volumena za vrijeme deformacije, tj. ( $A_0 L_0 = A_u L_u$ ) tada vrijedi:

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{A_0}{A_u}\right), \quad \sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon)$$

Razlike između nominalnog i stvarnog naprezanja i istezanja zanemarive su u elastičnom području materijala. U plastičnom području stvarno naprezanje i istezanje viši su nego odgovarajuće nominalne vrijednosti. Razlike inženjerske i stvarne  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje prikazane su na dijagramu vlačnog pokusa za običan brodograđevni čelik za uzorke izvađene iz limova u uzdužnom smjeru valjanja iz brodogradilišta (Slika 2-4) [4].



**Slika 2-4 Krivulje naprezanje-istezanje za obični brodograđevni čelik**

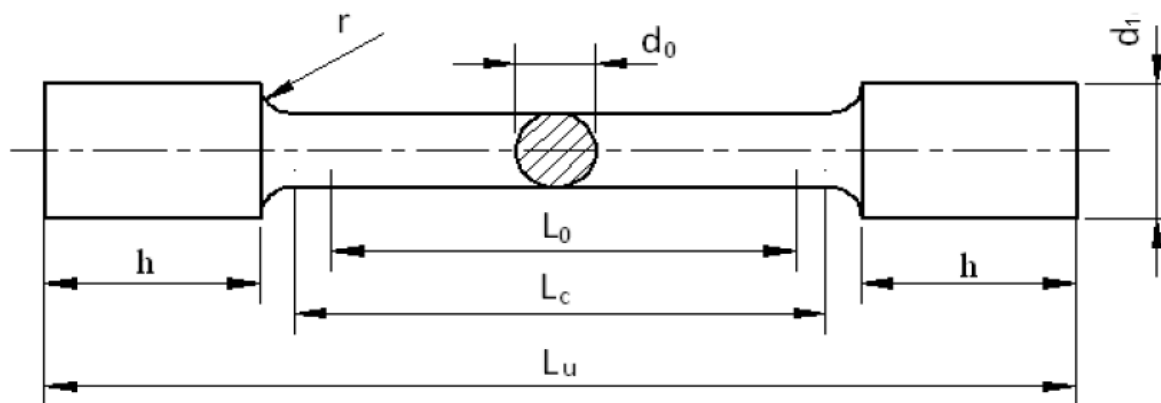
### *Epruvete za ispitivanje*

Prema zahtjevima Registra sve epruvete za ispitivanje trebaju se obraditi na propisane dimenzije, te pri uzimanju uzorka za ispitivanje ili epruveta za ispitivanje treba nastojati izbjeći deformacije materijala. Ako se epruvete za ispitivanje režu toplinskim postupkom ili piljenjem s uzorka, treba predvidjeti dovoljan dodatak, koji se kasnije odstranjuje strojnom obradom. Epruvete mogu biti okruglog ili plosnatog oblika, a prednost se obično daje proporcionalnim okruglim epruvetama, ali ako to nije moguće moraju se upotrijebiti plosnate epruvete.

Unos topline utječe na mehanička svojstva materijala, a budući da se to želi izbjeći, primjenjuje se rezanje vodenim mlazom. Limovi se proizvode postupkom valjanja pa je nužno za pouzdano ispitivanje svojstava materijala da su epruvete rezane u smjeru valjanja.

Za specificiranje ispitnih epruveta primjenjuju se sljedeće oznake (Slika 2-5):

- $d_0$  - promjer vrata epruvete
- $d_1$  - promjer glave
- $H$  - duljina glave
- $L_0$  - početna mjerna duljina
- $L_c$  - duljina ispitnog dijela
- $L_u$  - ukupna duljina epruvete
- $S_0$  - početna površina presjeka
- $r$  - prijelazni polumjer



**Slika 2-5 Karakteristične veličine okrugle epruvete**

Prvenstveno treba primjenjivati kratke proporcionalne epruvete, s početnom mjernom duljinom od  $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ , jer se zahtjevi za veličinom produljenja u Pravilima Registra odnose na tu mjernu duljinu. Preporučene vrijednosti proporcionalnih okruglih epruveta prema Registru dane su u tablici (Tablica 2-1).

**Tablica 2-1 Preporučene dimenzije epruveta prema Hrvatskom registru brodova**

Veličina	$d_0$	$L_0$	$L_c$	$r$
Dimenzija [mm]	14	70	85	10

## 2.4 Ostala svojstva čelika važna za konstrukciju brodskog trupa

- Modul elastičnosti

Youngov modul elastičnosti ili samo modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije, u linearnom ili elastičnom dijelu dijagrama naprezanja. Vrijedi i za tlačna naprezanja kod većine materijala.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{F \cdot L_0}{A_0 \cdot \Delta L}$$

- Poissonov omjer

Poissonov omjer ili Poissonov koeficijent se određuje kao omjer poprečnog naprezanja i uzdužnog produljenja nekog materijala prilikom vlačnog ispitivanja na kidalici. Bio bi jednak 0.5 ako se obujam tijela prilikom rastezanja ne bi promijenio. Ako se materijal tlači u smjeru jedne osi, onda se on širi u smjeru druge dvije osi. Većina materijala ima Poissonov omjer u području od 0 do 0.5.

$$\nu = \frac{-d\varepsilon_{trans}}{-d\varepsilon_{axial}} = \frac{d\varepsilon_x}{d\varepsilon_y} = \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_y}$$

gdje je:

$\nu$ - Poissonov omjer

$\varepsilon_{trans}$ - poprečno (transverzalno) suženje ili skupljanje

$\varepsilon_{axial}$ - uzdužno (aksijalno) produljenje

- Udarne žilavost

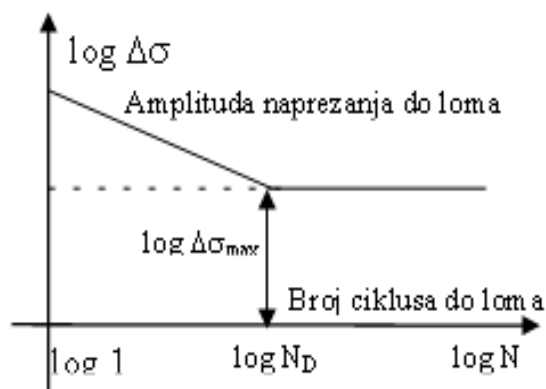
Udarne žilavost je mjera otpornosti materijala na udarno opterećenje i mjeri se količinom energije koju materijal apsorbira pri lomu. Brodograđevni čelik za dijelove konstrukcije trupa dijeli se prema mehaničkim svojstvima, tehnologiji izrade i kemijskom sastavu na četiri kategorije označene slovima A, B, D i E. Mehaničke razlike između čelika različitih kategorija A, B, D i E su u udarnoj žilavosti i to na niskim temperaturama.

- Zamorna čvrstoća

Promjenljiva naprezanja u čeliku i drugim materijalima izazivaju mikroskopske pukotine koje se vremenom povećavaju sve dok ne dođe do oštećenja. Oštećenja uslijed zamora su najčešće lokalna i pojavljuju se kod raznih detalja, slobodnih krajeva limova, veznih struktura, pričvršćenja i zavarenih spojeva. Na pojavu zamora utječu najprije promjenljiva opterećenja, ali i svojstva detalja, kakvoća projekta, izrade i nadzora detalja te hrđanje i starenje. Na pojave zamora ne utječu toliko iznosi naprezanja koliko utječu duljina izloženosti i raspon promjenljivih opterećenja, odnosno razlika najvećeg i najmanjeg naprezanja. Za promjenljiva naprezanja stalne amplitude  $\Delta\sigma$ , pokusima se utvrđuje broj



ciklusa do loma  $N$  (vijek trajanja detalja) za svaku vrstu detalja brodske konstrukcije kod kojeg se može pojaviti zamor [2]. Rezultati pokusa se obično prikazuju S-N dijagramima koji se zovu i Wöhlerove krivulje općenito u logaritamskom mjerilu kao  $(\Delta\sigma)^m \cdot N = C$ , gdje su  $m$  i  $C$  konstante kojima se određuje nagib i pomak krivulja (Slika 2-6).



**Slika 2-6 Dinamička izdržljivost pokusima S-N krivulja (Wöhlerove krivulje)**

## 2.5 Mehanička svojstva brodograđevnog čelika

Za običan brodograđevni čelik se može koristiti i oznaka MS (eng: mild steel). Brodograđevni čelik normalne čvrstoće je čelik za konstrukciju trupa s minimalnom nominalnom granicom razvlačenja od  $R_e^h = 235 \text{ N/mm}^2$ , a rastezna čvrstoća od  $R_m = 400$  do  $490 \text{ N/mm}^2$ . Brodograđevni čelik povišene čvrstoće je čelik za konstrukciju trupa s minimalnom nominalnom granicom razvlačenja od:  $R_e^h = 315, 355$  i  $390 \text{ N/mm}^2$

Čelici normalne i povišene čvrstoće jesu zavarljivi čelici koji se primjenjuju kao toplo valjani limovi, široke trake, šuplji i puni profili i namijenjeni su poglavito za izradu broskog trupa. Ovi čelici koriste se prvenstveno za dijelove čija debljina ne prelazi 50 mm. Propisana minimalna istezljivost od 22% odnosi se na veće debljine lima ili trake (40 – 50 mm), dok su za manje debljine minimalne vrijednosti istezljivosti posebno propisane.

### 2.5.1 Usporedba mehaničkih svojstava brodograđevnog čelika

Brodograđevni čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika, a najzastupljeniji su u proizvodnji i primjeni nosivih zavarenih konstrukcija. Čelici koji se danas primjenjuju u

brodogradnji dijele se prema mehaničkim svojstvima, tehnologiji izrade i kemijskom sastavu na kategorije A, B, D i E. Njihova je osnovna razlika u svojstvima udarne žilavosti pri različitim temperaturama (A i B vrijede za 0 °C, D za -20 °C, i E za -40 °C).

Brodograđevni čelici mogu biti normalne ( $R_e^h$  iznosi 235 N/mm<sup>2</sup>) ili povišene čvrstoće ( $R_e^h$  iznosi 315, 355 ili 390 N/mm<sup>2</sup>). Većina brodova se gradi od brodograđevnih čelika normalne čvrstoće, međutim radi smanjenja ukupnih troškova materijala i utroška pogonske energije došlo je do razvoja čelika povišene čvrstoće. Primjenom tih čelika smanjuje se masa konstrukcije zbog više granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Porast čvrstoće nije rezultat povećanoga udjela ugljika, već isključivo tehnologije prerade [5].

U ovom dijelu će se prikazati usporedba nominalnih i stvarnih mehaničkih svojstava običnog brodograđevnog čelika i brodograđevnih čelika povišene čvrstoće AH 32 i AH 36. Njihovo ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. Također će biti prikazana i međusobna usporedba dobivenih odstupanja za sve spomenute brodograđevne čelike.

**Tablica 2-2 Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti za obični brodograđevni čelik**

	Običan brodograđevni čelik	Nominalne vrijednosti	Odstupanje [%]
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	443,2	400 - 490	/
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	319,7	235	+ 26,49
$\epsilon_m$ [%]	20,19	22	- 8,23
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	207 900	206 000	+ 0,91

Iz Tablice 2-2 može se zaključiti da kod običnog brodograđevnog čelika postoje odstupanja stvarnih mehaničkih svojstava u odnosu na pripadne nominalne vrijednosti. Predznak postotka odstupanja u Tablici 2-2 ukazuje na to jesu li izmjerene vrijednosti mehaničkih

svojstava veće (pozitivan predznak „+“) ili manje (negativan predznak „-“) u odnosu na pripadne nazivne vrijednosti.

Granica razvlačenja  $R_e^h$  je veća za nešto više od 26% dok je istezljivost  $\epsilon_m$  manja za otprilike 8%. Vrijednost modula elastičnosti je u skladu s nominalnom vrijednosti za čelike.

**Tablica 2-3 Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti čelika AH 32**

	AH 32	Nominalne vrijednosti	Odstupanje [%]
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	539,19	440 - 590	/
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	347,40	315	+ 9,33
$\epsilon_m$ [%]	17,57	22	- 20,14
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	253 965	206 000	+ 18,89

Rezultati iz Tablice 2-3 pokazuju odstupanje stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika AH 32 od nominalnih za otprilike 10 - 20 %, što se približno podudara s ABS-ovim ispitivanjima u kojima je dobiveno odstupanje od 5 – 15 %. Vlačna čvrstoća uzorka  $R_m$  se uklopila u raspon nominalnih vrijednosti za čelik AH 32, međutim vrijednost granice razvlačenja  $R_e^h$  se pokazala većom za nešto više od 9 % u odnosu na nominalnu, čime se dobiva dodatna „rezerva“ u graničnoj čvrstoći broda. Istezljivost uzorka  $\epsilon_m$  je dobivena oko 20% manja, a modul elastičnosti  $E$  oko 19 % veći od odgovarajuće nominalne vrijednosti.

**Tablica 2-4 Usporedba stvarnih i nominalnih vrijednosti za čelik AH 36**

	AH 36	Nominalne vrijednosti	Odstupanje [%]
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	563,7	490 – 620	/
$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	393,4	355	+ 9,76
$\epsilon_m$ [%]	16,6	21	- 20,95
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	258 932,9	206 000	+ 20,44

Vidljivo je iz Tablice 2-4 da je vlačna čvrstoća  $R_m$ , kao i u ostalim brodograđevnim čelicima, u rasponu njene nazivne vrijednosti, no granica razvlačenja  $R_e^h$  je veća za skoro 10%. Istezljivost  $\epsilon_m$  je oko 21% manja, a modul elastičnosti  $E$  oko 20% veći od pripadne nominalne vrijednosti.

**Tablica 2-5 Usporedba odstupanja vrijednosti stvarnih mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika u odnosu na nominalne vrijednosti**

	AH 32	Običan brodograđevni čelik	AH 36
$R_e^h$	+ 9,33	+ 26,49	+ 9,76
$\epsilon_m$	- 20,14	- 8,23	- 20,95
$E$	+ 18,89	+ 0,91	+ 20,44

Usporedba apsolutnih vrijednosti stvarnih mehaničkih svojstava pojedinih brodograđevnih čelika ne otkriva puno pa je Tablicom 2-5 prikazana usporedba odstupanja vrijednosti mehaničkih svojstava od nominalnih.

Može se zaključiti da su vrijednosti odstupanja kod čelika povišene čvrstoće AH 36 približno jednake vrijednostima odstupanja kod čelika AH 32, dok su kod običnog brodograđevnog čelika izmjerene vrijednosti mehaničkih svojstava veće kod granice razvlačenja  $R_e^h$  i modula elastičnosti  $E$ , a manje kod istežljivosti  $\epsilon_m$ .

### **3 Granična čvrstoća brodskog trupa**

#### **3.1 Teorija proračuna granične čvrstoće brodskog trupa**

Kao i kod drugih proračuna, u bilo kojoj tehničkoj struci, tako i u proračunu granične čvrstoće postoji odnos točnosti i troškova proračuna. Budući da je slom strukture broda izuzetno kompleksan problem, do sada nije izvedena metoda koja bi omogućavala njegovu kompletnu i točnu analizu. Zbog toga je potrebno koristiti pojednostavljene i približne pristupe od kojih se većina može podijeliti na dvije kategorije.

Pojednostavljenjem i idealizacijom geometrije brodskog trupa moguće je identificirati određene dijelove strukture za koje se mogu razviti i primijeniti približne metode analize granične čvrstoće. Na primjer, paluba i bok broda mogu se promatrati kao roštiljne strukture, dok se dvodno može aproksimirati ortotropnom pločom. Međutim, ovaj pristup ima iste nedostatke kao i analiza odvojenog elementa, a to je nepoznavanje graničnih uvjeta, tj. nepoznavanje interakcije susjednih dijelova strukture, čak i kada se radi o istovrsnim elementima. Osim toga, geometrija broda ne dopušta uvijek takva pojednostavljenja; paluba može imati velike otvore, a dvodno može biti povezano s palubom preko upora.

Drugi pristup, koji se obično koristi da se pojednostavi analiza, je podjela analize na dva dijela; analizu izvijanja te analizu pojave plastičnih zglobova.

##### **3.1.1 Analiza izvijanja**

Ova analiza pretpostavlja da do sloma strukture dolazi isključivo putem izvijanja, a relativni odnosi opterećenja se smatraju konstantnim. Ove pretpostavke omogućavaju pretvaranje jednadžbi ravnoteže u problem svojstvenih vrijednosti za koji se brzo može naći direktno rješenje.

##### **3.1.2 Analiza plastičnih zglobova**

U ovom se pristupu pretpostavlja da se lom strukture uzrokuje pojavom mjesta velike plastične deformacije, tzv. plastičnih zglobova. Sistematska procedura se koristi za

određivanje odnosa opterećenja i nastajanja plastičnih zglobova, tj. najmanjeg opterećenja pri kojem će doći do pojave mehanizma i loma strukture.

Budući da su zasnovana na prethodnom određivanju tipa loma zbog kojeg dolazi do sloma cijele strukture, oba pristupa se mogu baviti graničnim stanjem, odnosno lomom strukture. Kako nema potrebe za računanjem stanja strukture prije pojave loma, količina potrebnog računanja je relativno mala. Međutim, oba pristupa ignoriraju istovremeno pojavljivanje više načina sloma na različitim mjestima strukture te mogućnost njihove kombinacije i interakcije.

Posljednjih godina metoda konačnih elemenata prilagođena je upotrebi za rješavanje nelinearnih problema koji uključuju obje nelinearnosti, geometrije i materijala. To je postignuto uvođenjem inkrementalnog i iterativnog pristupa, tj. korištenjem krivulja opterećenje – defleksija. Opterećenje se postupno povećava (određuje se iterativnim putem) te se za svako stanje provodi nekoliko linearnih analiza konačnih elemenata. Ovaj pristup omogućava analizu istovremene pojave izvijanja i popuštanja. Nadalje, moguće ga je primijeniti ne samo na pojedini element strukture, nego i na kompletnu strukturu koja uključuje interaktivni slom nekoliko elemenata zbog kombiniranog izvijanja i popuštanja.

Nažalost, ovaj pristup zahtijeva mnogo računanja te se višestruko povećava porastom i kompleksnošću strukture. Za današnja je računala trošak nelinearne analize konačnih elemenata prevelik da bi se metoda koristila previše rigorozno i za svaki problem. Ipak, superiornost metoda prevladava u analizi individualnog elementa te u analizi cijelokupne strukture, premda je potrebno uvesti neka pojednostavljenja da bi se reducirala količina računanja.

### **3.1.3 Analiza granične čvrstoće individualnog elementa**

Na ovom se nivou nelinearnosti izvijanja i plastičnih deformacija mogu riješiti aproksimirajućim analitičkim metodama zatvorenih formi. Budući da zahtijevaju puno manje računanja, a imaju zadovoljavajuću točnost po pitanju strukture, te metode su poželjne u nelinearnoj analizi konačnih elemenata gdje se analiza mora opetovano izvršavati. Ipak, te su metode približne. U najvećem broju slučajeva, one su poluempirijske te se sastoje od formula koje su izvedene iz temeljne teorije (idealizirane do nekog stupnja) zajedno s nekim

numeričkim izrazima ili koeficijentima koji su dobiveni eksperimentalno ili numerički. Zbog veće točnosti i općenitosti analize konačnih elemenata, njena glavna i najvrednija primjena je provjera točnosti u smislu daljnjeg razvijanja približnih analitičkih metoda.

Da bi se pojednostavile, svaka se od ovih metoda fokusira na specifičan tip strukturnog elementa (ploče, štapovi, grede, ukrepljeni paneli) i način sloma strukture.

### **3.1.4 Analiza granične čvrstoće modula trupa**

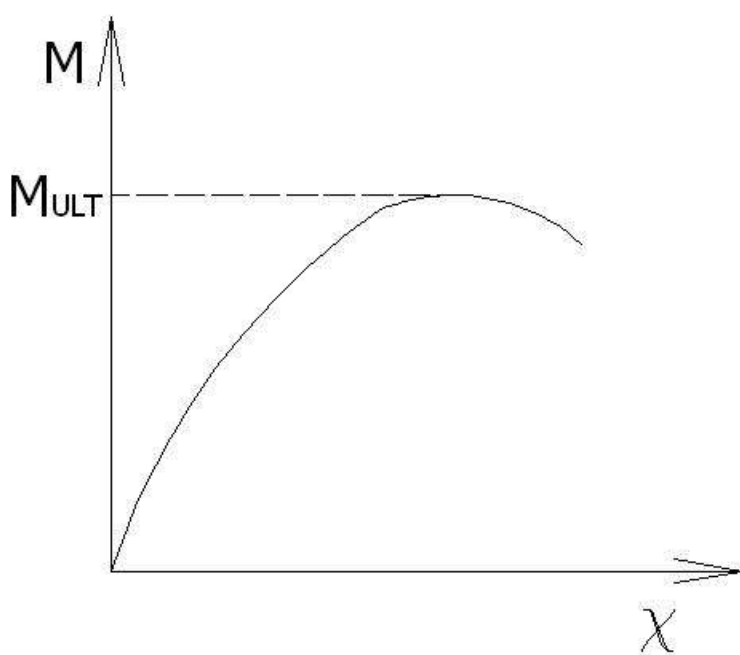
Slom modula trupa je sinonim sloma trupa kao grede što je zapravo, kao što je već navedeno, nesposobnost trupa da podnosi narinuta opterećenja (vertikalno i horizontalno savijanje, smično i torzijsko opterećenje). Drugim riječima, kolaps modula trupa je gubitak krutosti grede na savijanje, smik ili torziju. Pretpostavljeno je da je modul trupa prizmatičan, a poprečna struktura je okomita na uzdužnu. Također, velika ravninska krutost opločenja znači da nema uzdužnih pomaka spojeva. Prema tome može se zaključiti da se opći slom može dogoditi samo u uzdužnom smjeru i/ili u poprečnoj ravnini. Te se dvije kategorije sloma mogu opisati kako slijedi:

1. Uzdužna: slom dovoljnog broja uzdužno orijentiranih elemenata brodske grede što uzrokuje veliki gubitak krutosti na savijanje, smik ili torziju.
2. Poprečna: slom dovoljnog broja elemenata da se stvori mehanizam u poprečnom orebrenju što smanjuje potporu elementima uzdužne čvrstoće.

Ove dvije kategorije nisu neovisne jedna o drugoj jer slom u uzdužnom smjeru može uključivati jedno ili više poprečnih rebara. Prema tome, moguće je puno kombinacija sloma uzdužnih i poprečnih elemenata od kojih svaki može uključivati istovremeno izvijanje i plastičnu deformaciju pa bi njihovo uključivanje u analizu granične čvrstoće bilo prezahtjevno za današnja računala. Da bi se analizu učinilo računalno izvedivom, potrebno je uvesti posebna ograničenja. Najjednostavniji način da se to napravi je uvođenje ograničenja da svi poprečni presjeci moraju biti dovoljno čvrsti tako da bi svi uzdužni elementi doživjeli slom između dva poprečna presjeka prije nego što slom uključi više od jednog razmaka između poprečnih presjeka. To značajno pojednostavljuje analizu u dva smjera:

1. Modul trupa može se ispitivati u jednom trenutku preko samo jednog segmenta koji sadrži sve važnije strukturne elemente, a budući da su mnogi segmenti identični, potrebno je analizirati samo one opterećenje.
2. Uzdužni i poprečni tipovi sloma postaju neovisni te se mogu analizirati odvojeno što dodatno reducira količinu računa.

Za uzdužni globalni slom dominantno opterećenje je moment savijanja brodske grede, a glavni je odziv savijanje grede, što može biti izraženo pomoću zakrivljenosti grede  $\chi$ . Svi ostali uzdužni odzivi mogu se predstaviti korekcijama ili modifikacijama glavnog odziva. Izgled krivulje ovisnosti momenta savijanja i zakrivljenost predstavljen je na Slici 3-1.



**Slika 3-1 Ovisnost momenta savijanja o zakrivljenosti trupa**

Kao što je prikazano na Slici 3-1, granični moment savijanja je onaj gdje savojna krutost grede, tj. nagib krivulje  $M - \chi$  postaje nula. To se događa kad se dovoljan broj modela unutar pojedinog segmenta broskog trupa slomi, bilo zbog vlačnog ili tlačnog opterećenja. Tijekom globalnog sloma razni paneli nalaze se u različitim stupnjevima slamanja i unutar svakog panela glavni efekt opterećenja je produženje ili skraćenje koje gredi nameće moment savijanja kao rezultat zakrivljenosti  $\chi$ .

Jedna od glavnih prednosti zahtijevanja da nijedan tip sloma ne prethodi slomu između poprečnih presjeka je da brodski trup funkcioniра kao idealna greda cijelim tijekom procesa



sloma te se osnovna pretpostavka teorije grede, da poprečni presjeci ostaju u svojoj ravnini, primjenjuje s dovoljnom točnošću. Prema tome, uzdužna se deformacija zbog savijanja grede dobije iz izraza  $\varepsilon = z \cdot \chi$ , kako i vrijedi za elastično savijanje grede. Očito je, budući da je svaki panel izložen procesu loma što uključuje popuštanje, izvijanje ili oboje, odgovarajuća raspodjela naprezanja preko presjeka kritičnog segmenta vrlo nelinearna. Čak i unutar svakog panela odnos između srednjeg naprezanja i deformacije varira kako opterećenje raste. Svejedno, raspored deformacija ostaje približno linearan sve do sloma grede. Prema tome, granične vrijednosti elemenata koje imaju najveću važnost u uzdužnom slomu su vrijednosti granične deformacije  $\varepsilon_{ULT}$  ukrepljenih panela. Za svaki panel granična deformacija  $\varepsilon_{ULT}$  je količina nametnute tlačne deformacije koja uzrokuje slom tog panela. Kako bi se mogao izračunati granični moment  $M_{ULT}$ , potrebno je znati graničnu čvrstoću svakog panela, tj. količinu tlačnog opterećenja koje panel nosi u trenutku sloma. To se izražava srednjim naprezanjem panela u trenutku njegovog sloma  $\sigma_{i,ULT}$ .

Za globalni slom u poprečnom smislu glavni efekt opterećenja je moment savijanja u nosačima koji čine poprečno orebrenje, posebno momenti na krajevima i sredini nosača. Taj efekt ima tri različite granične vrijednosti; kritični moment savijanja  $M_{CR}$  za savojno – torzijsko izvijanje te momenti  $M_P$  i  $M_{FY}$  čije vrijednosti uzrokuju plastični zglob u nosaču te plastični mehanizam u pojasu nosača, zbog popuštanja pojasa. Slom se događa kada slomovi individualnih elemenata oslabe poprečno orebrenje koje više ne može pružati adekvatnu potporu glavnim uzdužnim elementima. To se uglavnom događa kada se u poprečnom orebrenju stvori plastični mehanizam.

## 3.2 Numeričko rješenje problema granične čvrstoće

U proračunima za potrebe ovog rada se koristio program MARS 2000 koji daje numeričko rješenje granične čvrstoće promatranog broda. Program koristi metodu analize progresivnog sloma s izračunatim krivuljama naprezanje – deformacija (eng. load - end shortening curves). Metoda se zasniva na inkrementalno – iterativnoj proceduri. Inkrementalni se dio očituje u postupnom povećavanju zakrivljenosti, a zakrivljenost svakog koraka  $c_i$  dobije se zbrajanjem zakrivljenosti u prethodnom koraku  $c_{i-1}$  i inkrementa  $\Delta c$ . Inkrement zakrivljenosti odgovara inkrementu kuta rotacije poprečnog presjeka brodske grede oko svoje horizontalne neutralne osi. Iterativnim se putem u svakom koraku dobiva novi položaj neutralne osi, tj. postavljanjem uvjeta da je sila koja djeluje u elementima koji se nalaze iznad neutralne osi jednaka sili koja djeluje u elementima ispod nje. Na kraju svakog koraka računa se ukupni moment savijanja zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svakog pojedinog elementa [4].

Rezultat metode je krivulja momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti  $M - \chi$ , a granični moment predstavlja vršne vrijednosti krivulje, u slučaju progiba (negativni predznak) i pregiba (pozitivni predznak).

### 3.2.1 Krivulje naprezanje – deformacija

Krivulje  $\sigma - \epsilon$ , „load – end shortening curves“ kako ih naziva IACS, opisuju ponašanje pojedinih vrsta elemenata pri procesu sloma brodskog trupa, odnosno pri inkrementalnoj proceduri povećavanja zakrivljenosti. Vrsta krivulje koja će se koristiti za opisivanje ponašanja pojedinog elementa ovisi o njegovom tipu, tj. da li je riječ o tzv. krutom kutu (eng. hard corner), poprečno ukrepljenom opločenju ili uzdužno ukrepljenom panelu. Naravno, vrsta krivulje ovisi i je li element podložen tlačnom ili vlačnom opterećenju, tj. ovisi i o njegovoj poziciji u odnosu na neutralnu os. IACS propisuje šest vrsta krivulja.

### 1) Elasto – plastični slom

Krivulja elastično – plastičnog sloma opisuje ponašanje produljenih poprečno ili uzdužno ukrepljenih panela. Na primjer, taj način sloma prati panel dna pri progibu ili panel palube pri pregibu. Po ovom se načinu slamaju i kruti spojevi kao što su spojevi bočnih nosača dvodna s opločenjem dna ili pokrova dvodna. Naprezanje je pozitivno za produljenje, a negativno za skraćenje.

Izraz koji daje naprezanje elementa glasi:  $\sigma = \Phi \cdot R_{eH}$ ,  $[N/mm^2]$ , gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija:

$$\Phi = -1 \quad \text{za} \quad \varepsilon < -1$$

$$\Phi = \varepsilon \quad \text{za} \quad -1 < \varepsilon < 1$$

$$\Phi = 1 \quad \text{za} \quad \varepsilon > 1$$

$\varepsilon$  : Relativna deformacija:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y}$$

$\varepsilon_E$  : Deformacija elementa:

$$\varepsilon = \chi_i \cdot Z_i$$

$\varepsilon_Y$  : Deformacija popuštanja materijala:

$$\varepsilon_Y = \frac{R_{eH}}{E}$$

$R_{eH}$  : Naprezanje tečenja materijala:

$$R_{eH} = 235 \text{ N/mm}^2 \quad \text{za B klasu čelika}$$

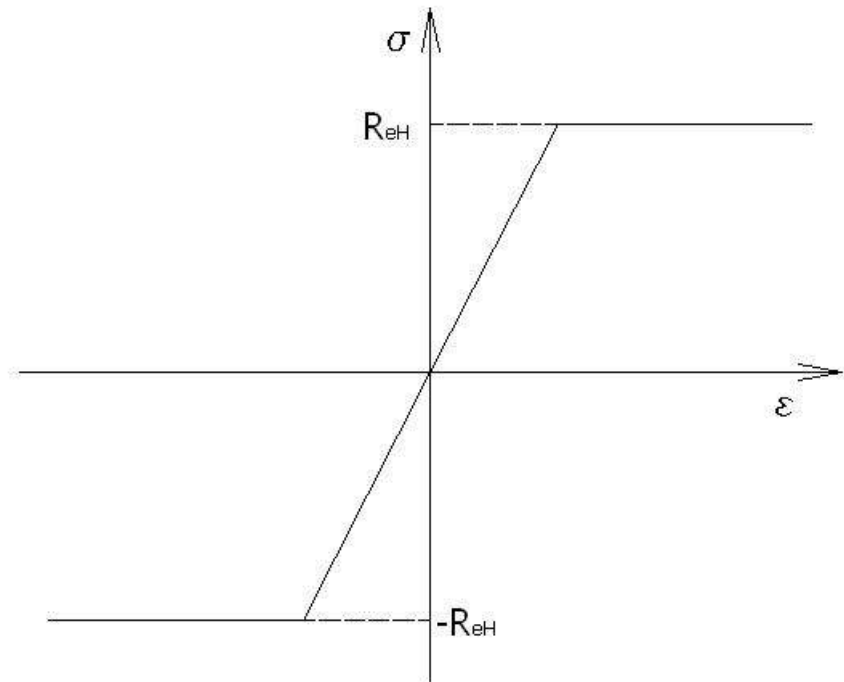
$$R_{eH} = 315 \text{ N/mm}^2 \quad \text{za AH32 klasu čelika}$$

$$R_{eH} = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \text{za AH36 klasu čelika}$$

E: Modul elastičnosti:

$$E = 206000 \text{ N/mm}^2 \quad \text{za čelik}$$

Krivulja naprezanja – deformacije za elasto – plastični slom prikazana je na Slici 3-2.



**Slika 3-2 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za elasto - plastični način sloma**

## 2) Gredno – štapno izvijanje

Krivulja gredno - štapnog izvijanja opisuje slom skraćenih uzdužno ukrepljenih panela. Na primjer, na taj se način slamaju panel palube pri progibu ili panel dna pri pregibu.

Na temelju rasporeda težina duž broda određuje se moment savijanja na mirnoj vodi.

Izraz naprezanja za gredno – štapno izvijanje:  $\sigma = \Phi \sigma_c \frac{A_s + 10 \cdot b_E \cdot t_P}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_P}$ ,  $[\text{N/mm}^2]$ , gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija

$\sigma_c$  : Kritično naprezanje,  $[\text{N/mm}^2]$ :

$$\sigma_c = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_c = R_{eH} \left( 1 - \frac{\Phi R_{eH} \varepsilon}{4 \sigma_E} \right) \quad \text{za } \sigma_E > \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$\varepsilon$  : Relativna deformacija

$\sigma_E$  : Eulerovo naprežanje štapnog izvijanja, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_E = \pi^2 E \frac{I_E}{A_E l^2} 10^{-4}$$

$I_E$  : Moment tromosti običnih ukrepa, [cm<sup>4</sup>], s pridruženom širinom oplata  $b_{E1}$ .

$b_{E1}$  : Širina pridružene oplata, [m]:

$$b_{E1} = \frac{s}{\beta_E} \quad \text{za } \beta_E > 1$$

$$b_{E1} = s \quad \text{za } \beta_E \leq 1$$

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eH}}{E}}$$

$A_E$  : Površina presjeka običnih ukrepa s pridruženom širinom oplata  $b_E$ , [cm<sup>2</sup>]

$A_S$  : Površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm<sup>2</sup>]

$s$ : Razmak uzdužnjaka, [m]

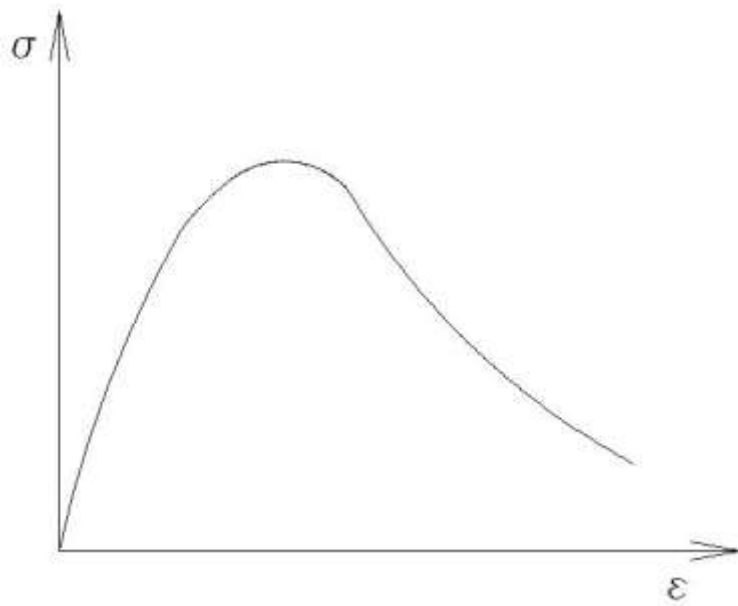
$t_p$  : Debljina pridružene oplata, [mm]

$b_E$  : Širina pridružene oplata, [m]:

$$b_E = \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) s \quad \text{za } \beta_E > 1.25$$

$$b_E = s \quad \text{za } \beta_E \leq 1.25$$

Izgled krivulje naprežanja – deformacije za ovaj način loma prikazan je na Slici 3-3.



**Slika 3-3 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za slom putem gredno – štapnog izvijanja**

### 3) Torzijsko izvijanje

Po torzijskom se izvijanju također mogu slamati skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli koji trpe lateralno – savojna opterećenja.

Izraz koji daje naprezanje elementa:  $\sigma = \Phi \frac{A_s \cdot \sigma_c + 10 \cdot s \cdot t_p \cdot \sigma_{cp}}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_p}$ ,  $[\text{N/mm}^2]$ , gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija,

$\sigma_c$  : Kritično naprezanje,  $[\text{N/mm}^2]$ :

$$\sigma_c = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_c = R_{eH} \left( 1 - \frac{\Phi \cdot R_{eH} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_E} \right) \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$\sigma_E$  : Eulerovo naprezanje torzijskog izvijanja,  $[\text{N/mm}^2]$ :

$\varepsilon$  : Relativna deformacija,

$\sigma_{cp}$  : Naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja,  $[\text{N/mm}^2]$ :

$$\sigma_{CP} = \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) R_{eH} \quad \text{za } \beta_E > 1.25$$

$$\sigma_{CP} = R_{eH} \quad \text{za } \beta_E \leq 1.25$$

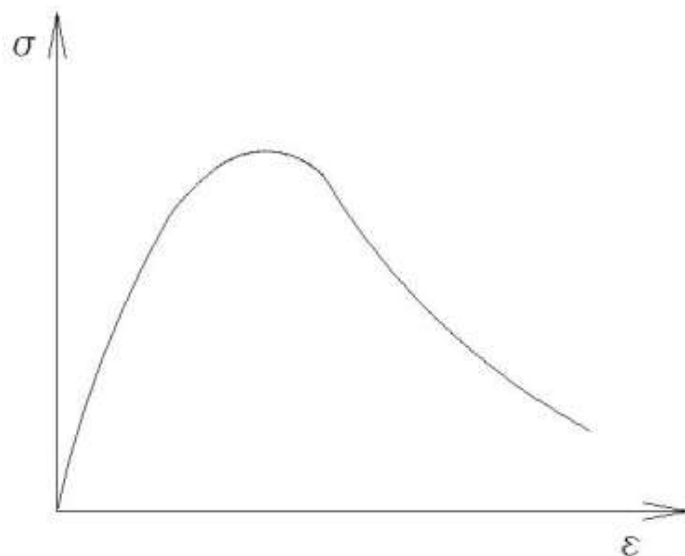
$\beta_E$  : Koeficijent

$A_s$  : Površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm<sup>2</sup>]

s: Razmak uzdužnjaka, [m]

$t_p$  : Debljina pridružene oplata, [mm]

Izgled krivulje naprezanja – deformacije za ovaj način loma prikazan je na Slici 3-4.



**Slika 3-4 Izgled krivulje  $\sigma - \epsilon$  za slom putem torzijskog izvijanja**

#### **4) Lokalno izvijanje struka običnih ukrepa sastavljenih od pojasnih profila**

Ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli.

Izraz za naprezanje elementa:  $\sigma = \Phi \cdot R_{eH} \frac{10^3 \cdot b_E \cdot t_P + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_P}{10^3 \cdot s \cdot t_P + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_P}$ , [N/mm<sup>2</sup>], gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija,

$b_E$  : Širina pridružene oplata, [m],

$h_w$  : Visina struka, [mm]

$t_w$  : Debljina struka, [mm]

$h_{wE}$  : Efektivna visina struka, [mm]:

$$h_{wE} = \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) h_w \quad \text{za } \beta_w > 1.25$$

$$h_{wE} = h_w \quad \text{za } \beta_w \leq 1.25$$

$\beta_E$  : Koeficijent

$$\beta_w = 10^3 \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot R_{eH}}{E}}$$

$\varepsilon$  : Relativna deformacija

$s$  : Razmak uzdužnjaka, [m]

$t_p$  : Debljina pridružene oplata, [mm]

### 5) Lokalno izvijanje struka običnih ukrepa sastavljenih od ravnih profila

Također ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli.

Izraz za naprezanje elementa:  $\sigma = \Phi \frac{10 \cdot s \cdot t_p \cdot \sigma_{CP} + A_s \cdot \sigma_C}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_p}$ , [N/mm<sup>2</sup>], gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija

$\sigma_{CP}$  : Naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja, [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_C$  : Kritično naprezanje, [N/mm<sup>2</sup>]:



$$\sigma_c = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_c = R_{eH} \left( 1 - \frac{\Phi \cdot R_{eH} \cdot \varepsilon}{4 \cdot \sigma_E} \right) \quad \text{za } \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

$\sigma_E$  : Eulerovo lokalno naprezanje izvijanja, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_E = 160000 \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2$$

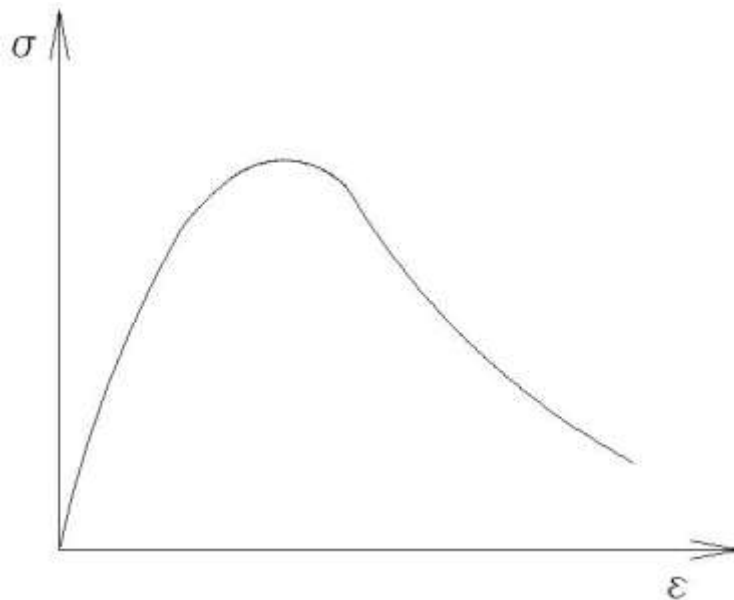
$\varepsilon$  : Relativna deformacija

$A_s$  : Površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm<sup>2</sup>]

$s$ : Razmak uzdužnjaka, [m]

$t_p$  : Debljina pridružene oplata, [mm]

Izgled krivulje naprezanja – deformacije za ovaj način loma prikazan je na Slici 3-5.



**Slika 3-5 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa**

## 6) Izvijanje opločenja

Ovaj izraz opisuje način slamanja putem izvijanja poprečno ukrepljene oplata:

$$\sigma = R_{eh} \left[ \frac{s}{l} \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) + 0.1 \left( 1 - \frac{s}{l} \right) \left( 1 + \frac{1}{\beta_E^2} \right)^2 \right], \quad [N/mm^2], \text{ gdje je:}$$

s: Razmak rebara, [m]

l: Duljina ploče, [m]

## 3.3 Algoritam numeričkog rješenja

Zakrivljenost izaziva aksijalne deformacije svakog strukturnog elementa trupa čije vrijednosti ovise o vertikalnoj poziciji elementa. U slučaju progiba, strukturni elementi koji se nalaze iznad neutralne osi skraćuju se, dok se elementi ispod neutralne osi produljuju. Obrnuto je u slučaju pregiba. Kao što je već napomenuto, naprezanje kojemu je podvrgnut pojedini element određuje se pomoću krivulja „load – end shortening curves“ elementa. Te krivulje određuju ponašanje elementa u nelinearnom elasto – plastičnom području.

Raspored naprezanja svih elemenata koji čine poprečni presjek trupa određuje, za svaki korak, trenutnu neutralnu os budući da odnos naprezanja i deformacije  $\sigma - \varepsilon$  nije linearan. Nova neutralna os koja se odnosi na promatrani korak određuje se iterativnim putem, tako da se odredi ravnoteža između naprezanja koja djeluju u elementima strukture.

Kada je određena neutralna os i prema tome raspored naprezanja, moment savijanja  $M_i$  oko nove neutralne osi, koji odgovara zakrivljenosti u promatranom koraku  $c_i$ , dobije se zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svakog elementa posebno.

Sljedeći su glavni koraci inkrementalno – iterativnog pristupa proračunu graničnog momenta savijanja:

1. Podjela poprečnog presjeka na elemente ukrepljenih panela.
2. Određivanje neutralne osi za nedeformiranu strukturu.
3. Definicija odnosa naprezanje – deformacija za sve elemente.
4. Početak postupka određivanjem početne zakrivljenosti.
5. Određivanje odgovarajućeg naprezanja za svaki element.

6. Nalaženje nove neutralne osi postavljanjem uvjeta ravnoteže preko cijelog presjeka.
7. Računanje ukupnog momenta savijanja zbrajanjem doprinosa svih elemenata momentu savijanja.

Početna se zakrivljenost dobije iz izraza:  $\chi_0 = 0.01 \cdot \varepsilon_y$ , gdje je  $\varepsilon_y$  deformacija popuštanja.

Deformacija popuštanja:  $\varepsilon_y = \frac{R_{eH}}{E}$ .

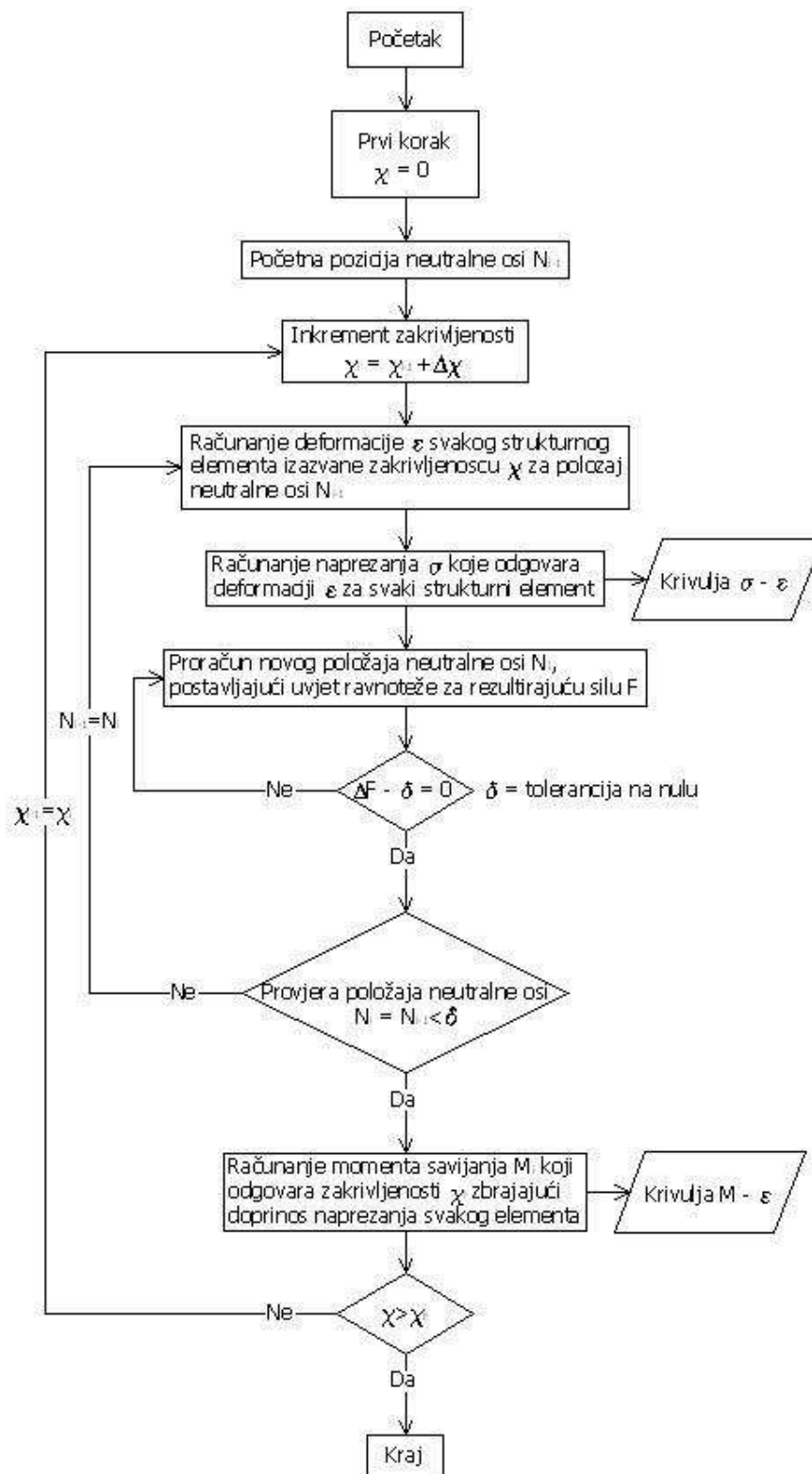
Postavljanje ravnoteže naprezanja preko cijelog poprečnog presjeka trupa izvodi se tako da sila koju uzrokuje naprezanje u elementima iznad neutralne osi bude jednaka sili koju izaziva naprezanje u elementima ispod neutralne osi.

Jednadžba uvjeta ravnoteže:  $\sum A_i \sigma_i = \sum A_j \sigma_j$ , [N], gdje je i indeks elemenata ispod, a j indeks elemenata iznad neutralne osi.

Kada je izračunata neutralna os za pojedini korak, treba zbrojiti doprinos naprezanja svih elemenata presjeka ukupnom momentu savijanja, prema izrazu:

$$M_U = \sum \sigma_{Ui} A_i |z_i - z_{Noi}|, \text{ [Nm]}$$

Na Slici 3-6 prikazan je algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja [2].



**Slika 3-6**      **Algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja**

## 4 Usporedba granične čvrstoće na osnovi nominalnih i stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika na primjeru broda za rasute terete

U Tablici 4-1 su prikazane opće karakteristike broda za rasute terete izgrađenog u hrvatskom brodogradilištu na kojemu je baziran proračun uzdužne i granične čvrstoće.

**Tablica 4-1 Glavne karakteristike broda**

Tip broda	Brod za prijevoz rasutog tereta
Proračunska duljina	180.614 m
Širina	32.240 m
Proračunski gaz	12.350 m
Visina	17.100 m
Koeficijent punoće	0.832
Nosivost	51 900 t
Područje plovidbe	Neograničeno

Osim glavnih dimenzija dani su i projektni momenti savijanja.

Momenti savijanja na mirnoj vodi iznose:

Pregib: 1 275 300 kNm

Progib: -1 275 300 kNm

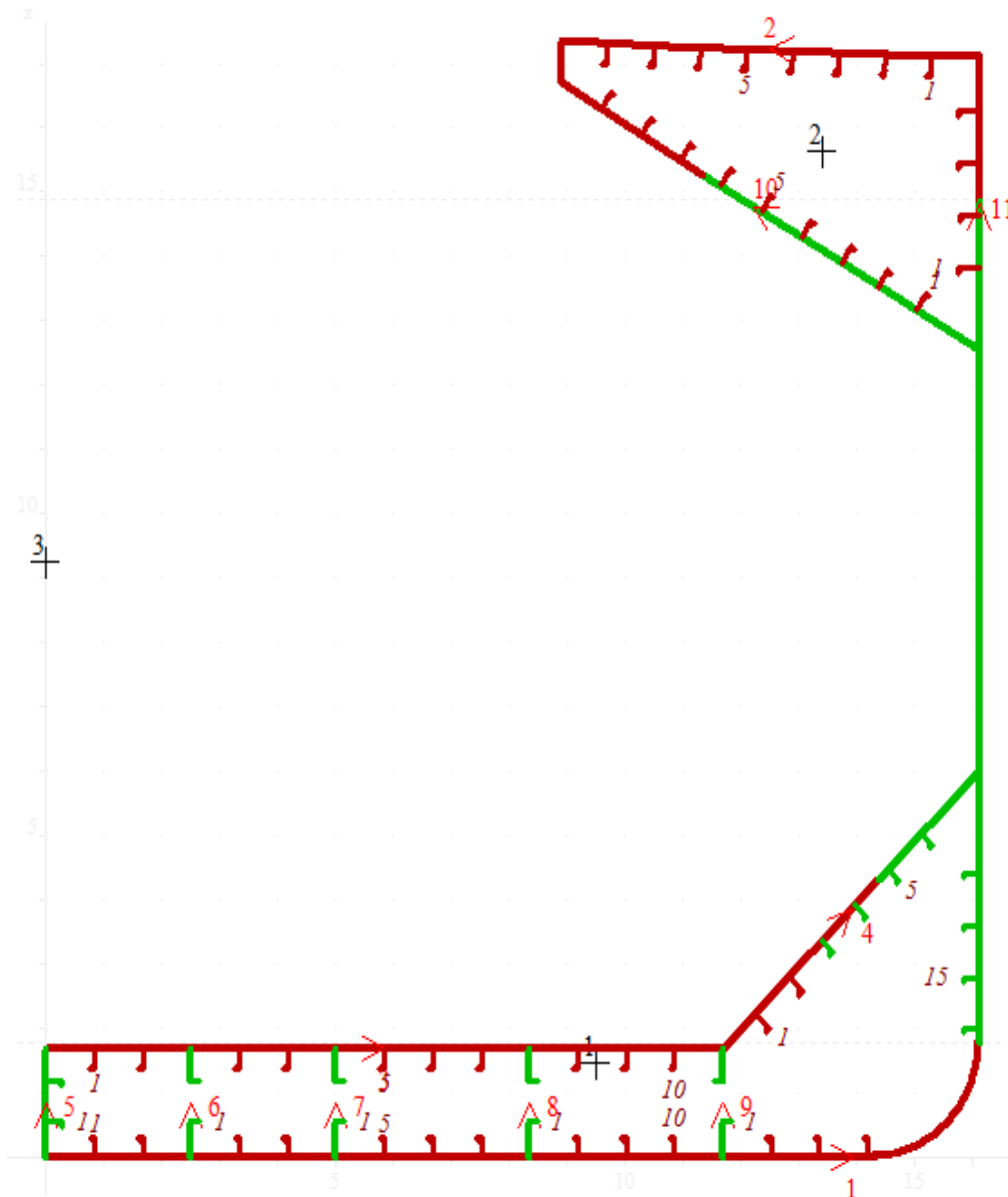
Proračuni u ovom poglavlju su se proveli pomoću računalnog programa *MARS 2000*, klasifikacijskog društva Bureau Veritas. U njemu su implementirana pravila za konstrukciju broda te numerički kôd, na osnovi inkrementalno-iterativne metode, za proračun granične čvrstoće. U programu je prije svega potrebno definirati geometriju glavnog rebra, zatim karakteristike materijala, te projektna opterećenja, momente i sile. Program računa

geometrijske karakteristike poprečnog presjeka, moment otpora, moment inercije, udaljenost neutralne osi i površinu. Definiranu konstrukciju uspoređuje s minimalnim dopuštenim vrijednostima i daje ocjenu krutosti svih strukturnih elemenata. Nadalje, računa uzdužnu čvrstoću broda na osnovi definirane geometrije i materijala, te projektnih i proračunskih opterećenja koja su određena pravilima registra.

Prvi proračun je proveden s nominalnim vrijednostima brodograđevnih čelika povišene čvrstoće, oznaka AH 32 i AH 36, koji imaju granice razvlačenja  $R_e^h = 315 \text{ N/mm}^2$  i  $R_e^h = 355 \text{ N/mm}^2$ , a drugi s eksperimentalno utvrđenim vrijednostima granice razvlačenja; za AH 32  $R_e^h = 347 \text{ N/mm}^2$  i za AH 36  $R_e^h = 393 \text{ N/mm}^2$ .

#### **4.1 Karakteristike poprečnog presjeka broda za rasute terete**

Na Slici 4-1 je prikazana geometrija glavnog rebra broda za rasute terete. Ideja je za navedeni brod provesti proračune i usporediti rezultate za nominalna svojstva te za izmjerena svojstva materijala. Različitim bojama program MARS 2000 prikazuje različite materijale korištene u konstrukciji. Stvarna konstrukcija je izgrađena od brodograđevnih čelika povišene čvrstoće AH 32 i AH 36 što je prikazano s dvije boje na slici. U prvom proračunu su svi limovi i profili izgrađeni od materijala nominalnih svojstava, a u drugom proračunu od materijala stvarnih svojstava. Na taj način je postignuta zornija usporedba ova dva proračuna.



### Slika 4-1 Geometrija glavnog rebra u programu MARS 2000

U nastavku su prikazane brojčane vrijednosti geometrijskih karakteristika u Tablicama 4-2 do 4-10. U ovisnosti o kriterijima pravila Registra, proračuni se provode s bruto i neto izmjerama. Bruto izmjere uzimaju u obzir dodatak za koroziju. Za proračune dimenzija vojeva i ukrepa, koji uključuju proračun zamora strukturnih detalja, te za proračun granične čvrstoće brodskog trupa kao grede koriste se neto izmjere. Bruto izmjere se koriste za proračun uzdužne čvrstoće - momenata otpora i provjeru pojave tečenja materijala. Program automatski računa neto vrijednosti iz definiranih bruto vrijednosti.

- **Bruto izmjere**

**Tablica 4-2 Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m<sup>2</sup>]**

<b>Površina poprečnog presjeka</b>	<b>Čelik AH 32</b>	<b>Čelik AH 36</b>	<b>Ukupno</b>
<b>Vojevi</b>	0.844514	1.896601	2.741115
<b>Uzdužnjaci</b>	0.115000	0.506280	0.621280
<b>Ukupno</b>	0.959514	2.402881	3.362395

**Tablica 4-3 Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m<sup>2</sup>]**

<b>Površina poprečnog presjeka</b>	<b>Čelik 347</b>	<b>Čelik 393</b>	<b>Ukupno</b>
<b>Vojevi</b>	0.844514	1.896601	2.741115
<b>Uzdužnjaci</b>	0.115000	0.506280	0.621280
<b>Ukupno</b>	0.959514	2.402881	3.362395

**Tablica 4-4 Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (bruto izmjere)**

<b>Veličina</b>	<b>Iznos</b>	<b>Jedinica</b>
Geometrijska površina poprečnog presjeka	3.362395	m <sup>2</sup>
Efektivna površina	3.333596	m <sup>2</sup>
Moment površine oko neutralne osi	10.020890	m <sup>3</sup>
Moment površine oko simetralne osi	17.460410	m <sup>3</sup>
Moment inercije za os y	145.867600	m <sup>4</sup>
Moment inercije za os z	447.038800	m <sup>4</sup>
Položaj neutralne osi (iznad osnovice)	6.21007	m
Moment otpora palube (17.100 m)	13.394720	m <sup>3</sup>
Moment otpora dna (0.000 m)	23.488900	m <sup>3</sup>

Ove značajke su (osim geometrijske površine) efektivne vrijednosti pod pretpostavkom homogenog materijala modula elastičnosti od 206000 (N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 4-5 Profili**

Tip	Dimenzije	Broj
flat	150 × 12	16
bulb	370 × 13	4
bulb	340 × 14	4
bulb	340 × 12	40
bulb	300 × 13	34
bulb	300 × 11	10
bulb	280 × 12	6
bulb	260 × 12	4
bulb	240 × 10	8

**Tablica 4-6 Vojevi**

Debljina [mm]	Duljina [m]
26.000	27.660
20.500	12.820
20.000	14.448
19.000	5.160
18.500	12.080
17.500	9.507
17.000	32.566
16.000	12.300
15.500	4.000
15.000	5.900
14.500	1.700
11.500	10.200

- **Neto izmjere**

**Tablica 4-7 Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m<sup>2</sup>]**

Površina poprečnog presjeka	Čelik AH 32	Čelik AH 36	Ukupno
<b>Vojevi</b>	0.746694	1.709537	2.446939
<b>Uzdužnjaci</b>	0.103237	0.460046	0.556359
<b>Ukupno</b>	0.849967	2.169603	3.019570

**Tablica 4-8 Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m<sup>2</sup>]**

Površina poprečnog presjeka	Čelik 347	Čelik 393	Ukupno
<b>Vojevi</b>	0.746694	1.709537	2.446939
<b>Uzdužnjaci</b>	0.103237	0.460046	0.556359
<b>Ukupno</b>	0.849967	2.169603	3.019570

**Tablica 4-9 Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (neto izmjere)**

Veličina	Iznos	Jedinica
Geometrijska površina poprečnog presjeka	3.019570	m <sup>2</sup>
Efektivna površina	2.994369	m <sup>2</sup>
Moment površine oko neutralne osi	8.996068	m <sup>3</sup>
Moment površine oko simetralne osi	15.638750	m <sup>3</sup>
Moment inercije za os y	131.094000	m <sup>4</sup>
Moment inercije za os z	399.940200	m <sup>4</sup>
Položaj neutralne osi (iznad osnovice)	6.16709	m
Moment otpora palube (17.100 m)	11.990770	m <sup>3</sup>
Moment otpora dna (0.000 m)	21.257030	m <sup>3</sup>

Ove značajke su (osim geometrijske površine) efektivne vrijednosti pod pretpostavkom homogenog materijala modula elastičnosti od 206000 (N/mm<sup>2</sup>).

U nastavku slijedi usporedbeni tablica geometrijskih svojstava poprečnog presjeka brodskog trupa za nominalna i stvarna svojstva materijala (Tablica 4-10).

**Tablica 4-10 Usporedbena tablica momenata otpora i inercije za čelike nominalnih i stvarnih svojstava**

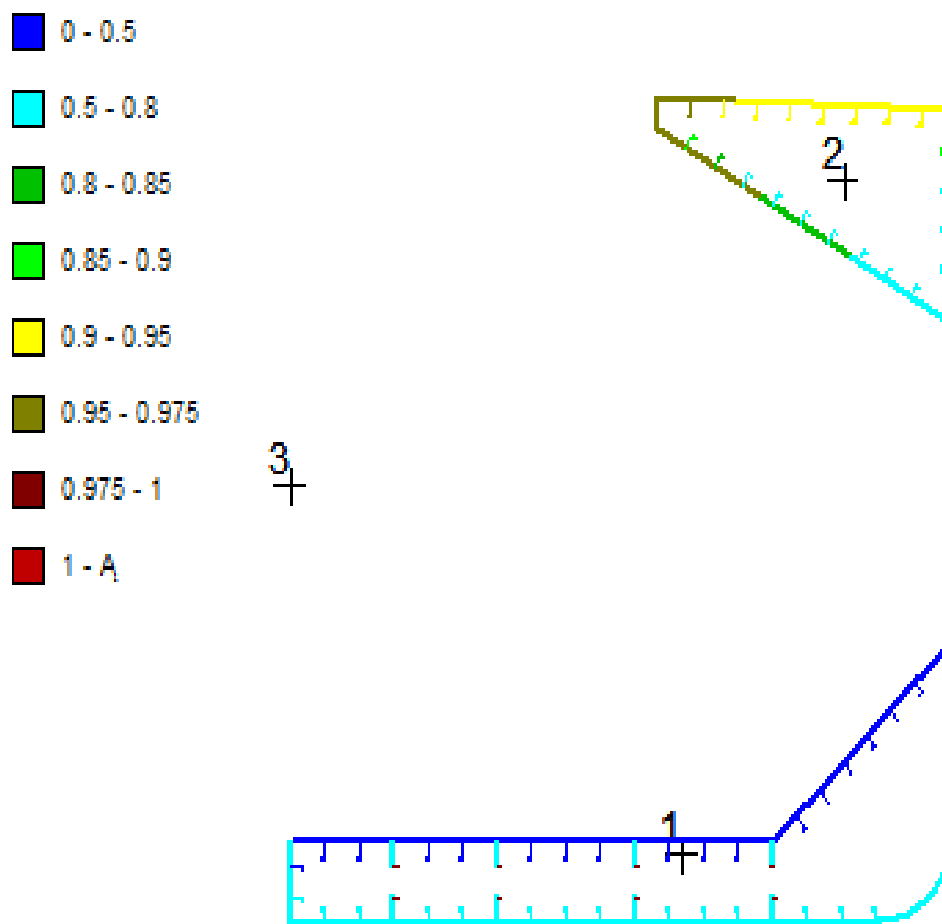
		Nominalna svojstva materijala		Stvarna svojstva materijala		
Vertikalni moment savijanja						
Položaj presjeka po duljini broda, X		90.307 [m]		90.307 [m]		
Minimalni moment otpora glavnog rebra (k=1)		13.697 [m <sup>3</sup> ]		13.697 [m <sup>3</sup> ]		
Zahtjevani momenti otpora						
	Paluba [m <sup>3</sup> ]	Dno [m <sup>3</sup> ]	Paluba [m <sup>3</sup> ]	Dno [m <sup>3</sup> ]		
Minimalni moment otpora	9.862	9.862	9.279	9.279		
Neoštećeno stanje						
Na osnovi projektnog B.M. u pregibu (2 845 669 kNm)	10.784	10.784	10.146	10.146		
Na osnovi projektnog B.M. u progibu (-2 949 380 kNm)	11.177	11.177	10.516	10.516		
Naplavljeno stanje						
Na osnovi B.M. za oštećeno stanje u pregibu (1 256 295 kNm)	4.761	4.761	4.479	4.479		
Na osnovi B.M. za oštećeno stanje u progibu (-1 339 264 kNm)	5.075	5.075	4.775	4.775		
Zahtjevani moment otpora	11.177	11.177	10.516	10.516		
Provjera momenata otpora i momenata tromosti						
	Zahtjev	Stvarno	Zahtjev	Stvarno		
Paluba ( z = 17.100 m)	11.177	11.991	10.516	11.991		
Dno (z = 0.000 m)	11.177	21.257	10.516	21.257		
Moment tromosti	74.216	131.094	74.216	131.094		
Provjera neto/bruto momenata otpora						
	Bruto	Neto	%	Bruto	Neto	%
Paluba ( z = 17.100 m)	13.395	11.991	89.5	13.395	11.991	89.5
Dno (z = 0.000 m)	23.489	21.257	90.5	23.489	21.257	90.5

## 4.2 Proračun granične čvrstoće na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

U Tablici 4-11 su prikazana opterećenja brodskog trupa s kojima se provodio proračun granične čvrstoće na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika. Slika 4-2 prikazuje omjere naprezanja pojedinih panela glavnog rebra za zadana opterećenja i definiranu konstrukciju. Dvije nijanse plave boje sugeriraju najmanje opterećenje presjeka. S druge strane, potpuno očekivano, vojevi palube i praznice grotla su najopterećenije, budući da ovaj dio ima najmanju geometrijsku krutost.

**Tablica 4-11 Opterećenje brodskog trupa kao grede na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000**

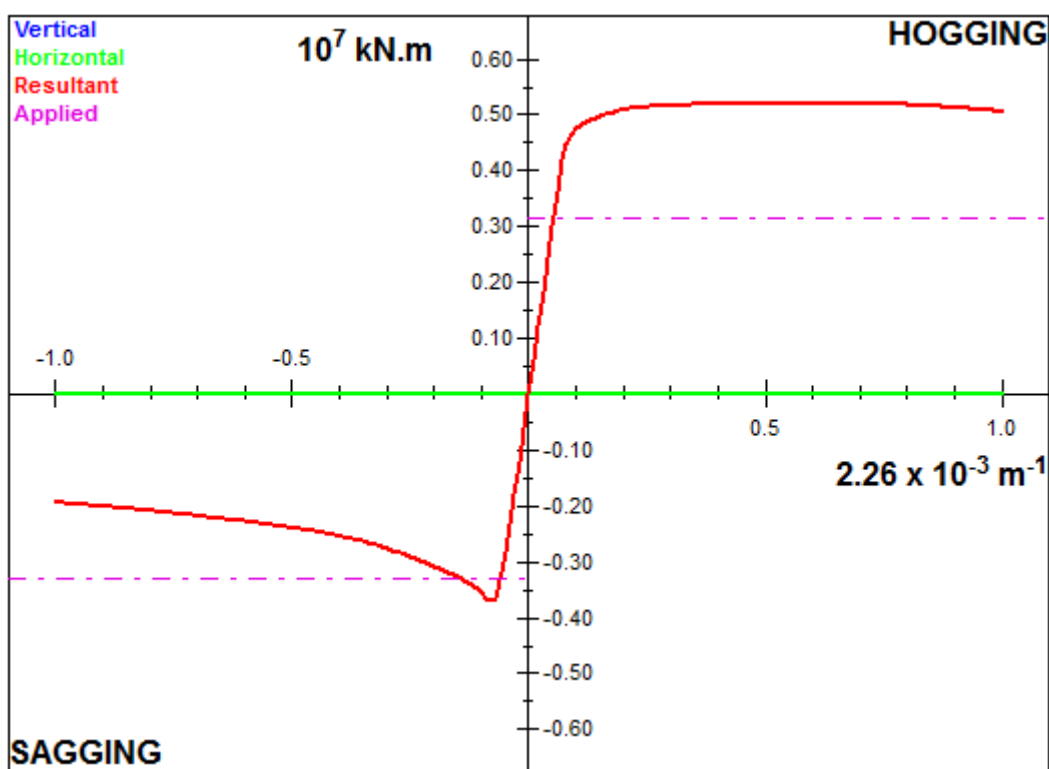
<b>Vertikalni moment savijanja</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M. Procjena brodograditelja	1 275 300	1 275 300
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na gl. rebru	1 092 940	-989 229
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na X = 90.307 m	1 092 940	-989 229
Vertikalni moment savijanja od valova (pravila) X = 90.307 m	1 570 369	-1 674 080
<b>Projektna opterećenja trupa na X = 90.307 m</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M	1 275 300	-1 275 300
Moment savijanja od valova (pravila)	1 570 369	-1 674 080
Horizontalni moment savijanja od valova	1 235 738	
	Pozitivna (kN)	Negativna (kN)
Vertikalna poprečna sila na mirnoj vodi	0	
Vertikalna poprečna sila od valova	17 695	-17 695
<b>Dozvoljene vertikalne poprečne sile (kN)</b>		
Ukupna dozvoljena vertikalna poprečna sila	67 232	
Pozitivna dozvoljena vertikalna poprečna sila	49 537	
Negativna dozvoljena vertikalna poprečna sila	49 537	



**Slika 4-2 Uzdužna čvrstoća broda na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000**

**Tablica 4-12 Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000**

Opcije proračuna				
Izmjere		Neto (s dodatkom za koroziju x 0.5)		
Rješenje		Standardna kontrola		
Moment		Fiksni horizontalno/vertikalni omjer		
Omjer		0.00		
Moment savijanja [kNm]		Pregib		Progib
Moment sloma broskog trupa, $M_u$		5 210 029		- 3 708 641
		Granični	$M_b$	%
Navigacija	Pregib	4 736 390	3 159 743	66.71
	Progib	- 3 371 492	- 3 284 196	97.41
Luka	Pregib	4 736 390	2 971 299	62.73
	Progib	- 3 371 492	- 3 083 307	91.45
Oštećeno	Pregib	4 736 390	1 507 554	31.83
	Progib	- 3 371 492	- 1 607 117	47.67



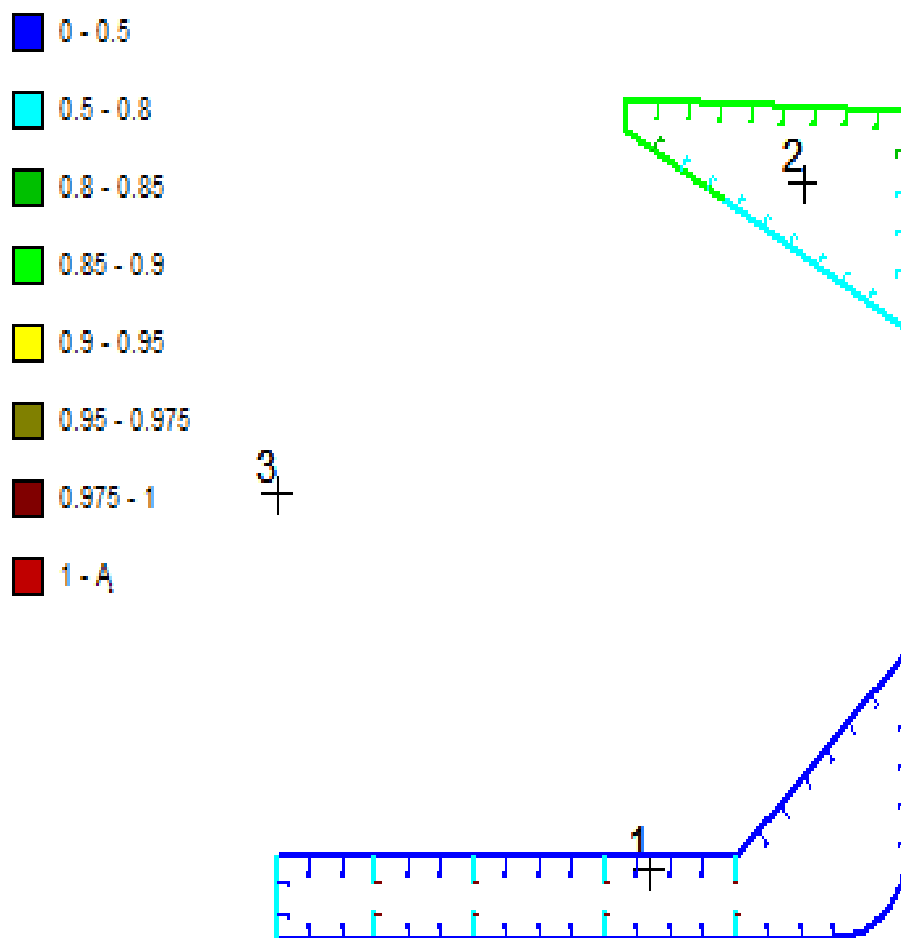
**Slika 4-3 Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $M - \chi$  na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000**

### 4.3 Proračun granične čvrstoće na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

U Tablici 4-13 su prikazana opterećenja broskog trupa s kojima se provodio proračun granične čvrstoće na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika. Slika 4-4 prikazuje omjere naprezanja pojedinih panela glavnog rebra za zadana opterećenja i definiranu konstrukciju. Za razliku od prethodne slike, uočava se smanjenje razlika naprezanja između pojaseva palube i dna. Dakle, povećanjem svojstava materijala povećala se krutost i tako nadomjestila prethodni nedostatak geometrijske krutosti.

**Tablica 4-13 Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000**

<b>Vertikalni moment savijanja</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M. Procjena brodograditelja	1 275 300	1 275 300
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na gl. rebru	1 092 940	-989 229
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na X = 90.3 m	1 092 940	-989 229
Vertikalni moment savijanja od valova (pravila) X = 90.3 m	1 570 369	-1 674 080
<b>Projektna opterećenja trupa na X = 90.3 m</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M	1 275 300	-1 275 300
Moment savijanja od valova (pravila)	1 570 369	-1 674 080
Horizontalni moment savijanja od valova	1 235 738	
	Pozitivna (kN)	Negativna (kN)
Vertikalna poprečna sila na mirnoj vodi	0	
Vertikalna poprečna sila od valova	17 695	-17 695
<b>Dozvoljene vertikalne poprečne sile (KN)</b>		
Ukupna dozvoljena vertikalna poprečna sila	71 640	
Pozitivna dozvoljena vertikalna poprečna sila	53 945	
Negativna dozvoljena vertikalna poprečna sila	53 945	

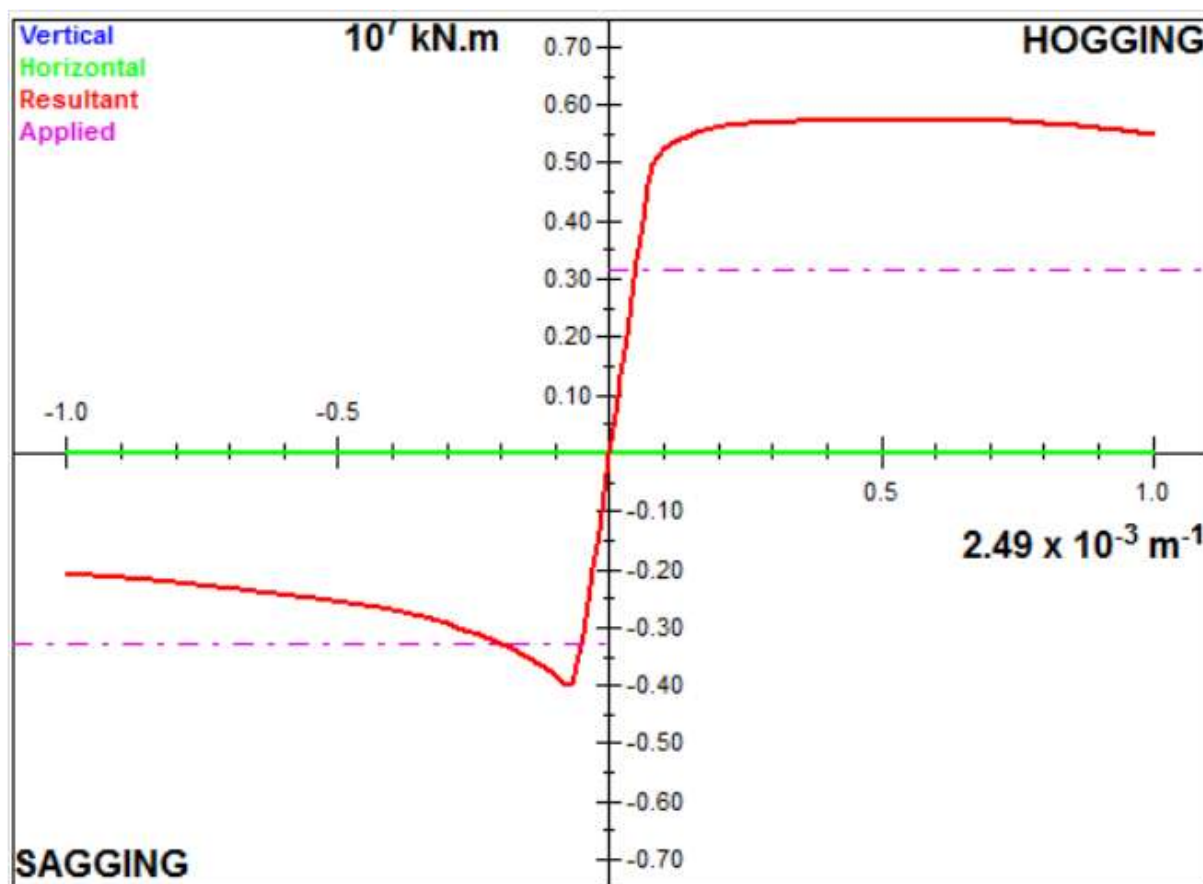


**Slika 4-4 Uzdužna čvrstoća broda na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000**



**Tablica 4-14 Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika - MARS 2000**

Opcije proračuna				
Izmjere		Neto (s dodatkom za koroziju x 0.5)		
Rješenje		Standardna kontrola		
Moment		Fiksni horizontalno/vertikalni omjer		
Omjer		0.00		
Moment savijanja [kNm]		Pregib		Progib
Moment sloma broskog trupa, $M_u$		5 745 406		- 4 009 548
		Granični	$M_b$	%
Navigacija	Pregib	5 223 096	3 159 743	60.50
	Progib	- 3 645 043	- 3 284 196	90.10
Luka	Pregib	5 223 096	2 971 299	56.89
	Progib	- 3 645 043	- 3 083 307	84.59
Oštećeno	Pregib	5 223 096	1 507 554	28.86
	Progib	- 3 645 043	- 1 607 117	44.09



**Slika 4-5 Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $M - \chi$  na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000**

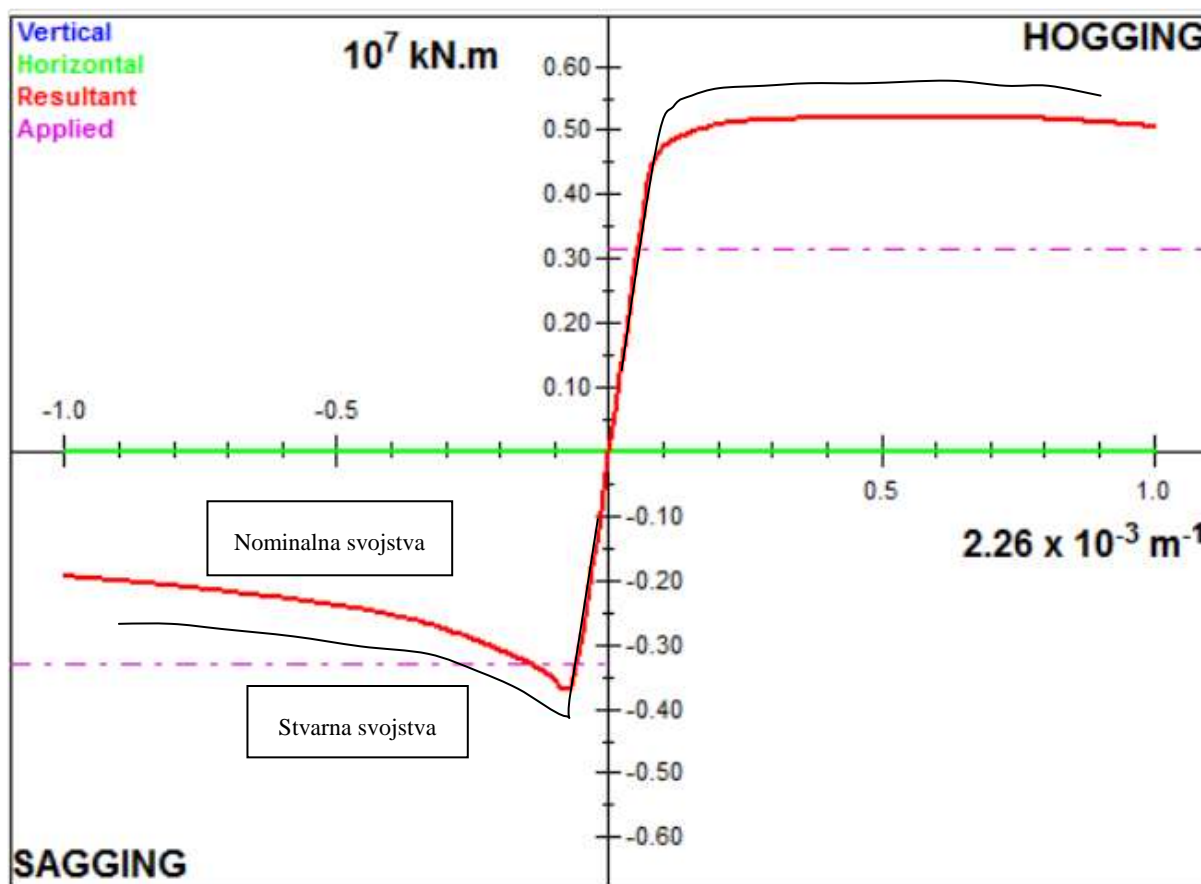
#### 4.4 Usporedba i analiza rezultata proračuna granične čvrstoće

U Tablici 4-15 su prikazana povećanja granične čvrstoće i faktora sigurnosti na osnovi stvarnih karakteristika materijala u odnosu na nominalne. Evidentno je da su ova povećanja proporcionalna razlici mehaničkih svojstava materijala.

**Tablica 4-15 Usporedba rezultata proračuna na temelju nominalnih i stvarnih mehaničkih svojstava materijala - MARS 2000**

		AH 32/AH 36	ČELIK 347/ ČELIK 393	Faktor povećanja
<b>Dozvoljena vertikalna poprečna sila, [kN]</b>	Ukupna	67 232	71 640	1.066
	Pozitivna	49 537	53 945	1.089
	Negativna	49 537	53 945	1.089
<b>Moment savijanja <math>M_b</math>, [kNm]</b>	Pregib	3 159 743	3 159 743	1.000
	Progib	-3 284 196	-3 284 196	1.000
<b>Granični moment savijanja, [kNm]</b>	Pregib	4 736 390	5 223 096	1.103
	Progib	- 3 371 492	- 3 645 043	1.081
<b>Moment sloma broskog trupa <math>M_u</math>, [kNm]</b>	Pregib	5 210 029	5 745 406	1.103
	Progib	3 708 641	4 009 548	1.081
<b>Faktor sigurnosti <math>\gamma</math></b>	Pregib	1.499	1.653	1.103
	Progib	1.027	1.110	1.081

Na sljedećoj slici (Slika 4-6) je, radi zornije usporedbe, prikazan zajednički dijagram momenata savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $M - \chi$  na osnovi stvarnih i nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika.



Slika 4-6 Zajednički dijagram momenata savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $M - \chi$  na osnovi stvarnih i nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelika - MARS 2000

## 5 Pouzdanost konstrukcije

### 5.1 Općenito o pouzdanosti

Pouzdanost tehničkih predmeta je u velikoj mjeri neodvojivo, ugrađeno svojstvo sustava, komponente ili nekog proizvoda, posljedica složenog međudjelovanja komponenata sustava, i kao takva ona je važan čimbenik u razmatranju (projektiranju) inženjerskih sustava i procesa. Ocjenjivanje pouzdanosti može se u brodskim konstrukcijama provesti na više strukturnih razina: brodski trup u cjelini, palube, dno, bok, pregrade, statve, nosači, okviri, rešetke, roštilji, paneli, limovi, ukrepe i detalji u konstrukciji uz definiranje kriterija oštećenja na svakoj razini za sve komponente. Inženjerske sustave treba razmatrati sa znanjem da prikupljenim informacijama o djelovanju sustava treba pridružiti i njihove neizvjesnosti. Racionalno tretiranje neizvjesnosti uvjetuje razmatranje pouzdanosti svih razina brodske konstrukcije.

Projektiranje i analiza konstrukcija općenito, a tako i u brodogradnji, dugi su se niz godina temeljili, a i danas se još većina praktičnih proračuna provodi na osnovama determinističkih metoda, korištenjem matematičkih modela koji nedovoljno pouzdano opisuju stvarnu konstrukciju i njezin okoliš. Dimenzije, karakteristike materijala, način djelovanja i opterećenja se pretpostavljaju i vrši se analiza koja treba osigurati više ili manje detaljan opis brodske konstrukcije. Mjerom sigurnosti smatran je omjer između izdržljivosti i opterećenja definiran kao faktor sigurnosti, čije su vrijednosti tradicionalno bile određivane na temelju iskustva i inženjerske procjene, te se vremenom prilagođavale stvarnosti.

Glavni cilj projektiranja brodskih konstrukcija je ostvariti sigurnost, funkcionalnost i zadovoljavajuću djelotvornost uz zahtijevanu razinu pouzdanosti kroz cijeli vijek korištenja broda u svim okolnostima. Kako se to treba ostvariti u neizvjesnim uvjetima neophodna je primjena projektne procedure koja uzima u obzir više informacija nego deterministička metoda u projektiranju konstrukcija. Ove informacije uključuju neizvjesnosti u pogledu svojstava materijala, izdržljivosti različitih komponenata konstrukcije, neizvjesnosti opterećenja kojima su izloženi kao i greške (neizvjesnosti) modela i postupka analiziranja.

## 5.2 Metode pouzdanosti

Logičan pristup procjeni pouzdanosti i sigurnosti konstrukcija je statistički, jer treba opisati slučajne varijable o kojima ovisi opterećenje i izdržljivost konstrukcije i na osnovi toga definirati pouzdanost konstrukcije kao vjerojatnost da neće doći do njenog oštećenja ili loma. Neizvjesnosti u pogledu opterećenja, izdržljivosti i modeliranja brodskih konstrukcija traže primjenu postupaka različitih od tradicionalnog determinističkog pristupa. Kao odgovor na nedostatke determinističkog pristupa projektiranju i analizi konstrukcija, razvijene su metode pouzdanosti utemeljene na vjerojatnosnim postupcima i statističkim obilježjima varijabli koje se kvantificiraju na temelju statističke analize podataka sakupljenih u tu svrhu. Ove metode nalaze primjenu u projektiranju konstrukcija i ponovnoj procjeni sigurnosti postojećih konstrukcija. Pouzdanost komponenata i osnovnih sklopova brodskih konstrukcija se može definirati kao vjerojatnost da razmatrani dio funkcionira kako je predviđeno u svom vijeku trajanja. Da bi bilo moguće odrediti pouzdanost vjerojatnosnim postupcima, potrebno je uvesti statističke varijable i stohastičke procese i definirati kada se konstrukcija smatra oštećenom, a kada ne. Za određivanje pouzdanosti komponenata i sklopova brodske konstrukcije potrebno je dakle poznavati načine djelovanja, statistička svojstva veličina kojima se opisuje brodska konstrukcija, statistička svojstva opterećenja i materijala, te primijeniti vjerojatnosne postupke.

Uvriježeno je mišljenje da je matematička teorija vjerojatnosti racionalna i prirodna osnova za modeliranje pouzdanosti konstrukcija. Fizikalne varijable se smatraju kao slučajne varijable, a pouzdanost u odnosu na promatrani oblik oštećenja se jednostavno definira kao vjerojatnost za koju će rješenje granične funkcije za zadanu osnovnu slučajnu varijablu  $X$  biti pozitivno ( $g > 0$ ). Komplementarna vjerojatnost je vjerojatnost pojave oštećenja za razmatrani oblik oštećenja. Pouzdanost se često jednostavno definira kao vjerojatnost da će sustav (komponenta) ispravno raditi u nekom vremenskom periodu  $t$ .

Informacije o modelima na kojima se temelje metode pouzdanosti općenito su nepotpune. Stoga se procijenjenu pouzdanost treba shvatiti kao nominalnu mjeru pouzdanosti, a ne kao apsolutni broj. Međutim, ako su pouzdanosti određene za različite cjeline brodske konstrukcije za koje postoji ista razina informacija i jednaki matematički modeli, mogu se dobiti korisne usporedbe pouzdanosti. Pouzdanost procijenjena kao mjera sigurnosti strukture može se koristiti u procesu odlučivanja, tj. u procesu projektiranja.

### 5.3 Razine metoda pouzdanosti

Nedostatak statističkih podataka o varijablama u brodskim konstrukcijama kao i složenost vjerojatnosnih postupaka razlozi su postojanja više razina metoda pouzdanosti koje je moguće primijeniti u projektiranju brodskih konstrukcija. Četiri su razine određivanja pouzdanosti kod kojih su vjerojatnosni postupci zastupljeni u različitoj mjeri:

- **Razina 1.** Neizvjesni parametri modeliraju se pomoću jedne karakteristične vrijednosti kao u pravilima klasifikacijskih društava. Postupci koje koriste ovaj pristup predstavljaju metode prve razine. Osnovni oblik metode se naziva **metodom karakterističnih vrijednosti**. Postupak prilagođen inženjerskim prikazima se naziva **metodom parcijalnih faktora sigurnosti (LRFD)**.
- **Razina 2.** Neizvjesni parametri modeliraju se pomoću očekivanja (srednja vrijednost) i standardne devijacije, te pomoću koeficijenata korelacije između stohastičkih varijabli. Metode pouzdanosti druge razine koriste statističke momente prvog i drugog reda, ali ne i funkcije razdiobe, zbog čega se ovi postupci zovu **metode drugih momenata**. Prema složenosti bavljenja funkcijama graničnih stanja razlikuju se metode prvog reda (*First Order Methods*) kod kojih se funkcija graničnog stanja samo linearizira i funkcije drugog reda (*Second Order Methods*) kod kojih se funkcije graničnih stanja aproksimiraju funkcijama drugog reda. Stohastičke varijable se implicitno smatraju raspodijeljene po normalnoj razdiobi. Vjerojatnosti oštećenja se ne mogu točno izračunati, ali se mogu odrediti donje i gornje granice. Primjer metode ove razine je metoda indeksa pouzdanosti ( $\beta$ ). Napredniji postupci ove razine pretpostavljaju da varijable ne moraju biti raspodijeljene normalno nego mogu imati bilo koju razdiobu. Postupak koji se može koristiti u ovim slučajevima je aproksimacija stvarnih distribucija normalnim koji se naziva „**normal tail approximations**“.
- **Razina 3.** Neizvjesne veličine se modeliraju združenim funkcijama razdiobe slučajnih varijabli. Mjera pouzdanosti je vjerojatnost da ne dođe do oštećenja promatranog dijela konstrukcije. Ova razina je vrlo složena i uključuje numeričke integracije i simulacijske tehnike u određivanju vjerojatnosti oštećenja. U mnogim slučajevima jedini način za procjene pouzdanosti multivarijantnih funkcija razdiobe i nelinearnih funkcija ograničenja je Monte-Carlo simulacija. Osnovne simulacijske metode zvane još i sirove (crude) su numerički i vremenski jako zahtjevne te postoje brojni postupci za njihovo ubrzanje.

- **Razina 4.** Četvrta razina uključuje bilo koju od prve 3 u sprezi s ekonomskim parametrima za predviđanje maksimalne dobiti ili minimalne cijene. Metode četvrte razine zovu se *metode odlučivanja*. Kod ovih metoda posljedice oštećenja se također uzimaju u obzir i rizik (posljedice x vjerojatnost oštećenja) se koristi kao mjera pouzdanosti. Na ovaj način različiti projekti se mogu usporediti na ekonomskoj osnovi, uzimajući u obzir neizvjesnost, cijenu i dobit.

Ocjenjivanje pouzdanosti je iterativan proces koji počinje sa specificiranjem ciljeva pouzdanosti uz zadana ograničenja i općenito se sastoji od sljedećih koraka [7]:

1. Odabrati razinu pouzdanosti (zahtijevana pouzdanost).
2. Identificirati oblike oštećenja strukture.
3. Razdijeliti oblike oštećenja na serijske sustave i paralelne sustave od jedne komponente (ukoliko se oblici oštećenja sastoje od više od jedne komponente).
4. Formirati funkcije graničnih stanja za svaki oblik oštećenja i za svaku komponentu sustava.
5. Identificirati stohastičke varijable i determinističke parametre u funkcijama oštećenja. Specificirati tipove distribucija i statističke parametre za stohastičke varijable i zavisnosti među njima.
6. Procijeniti pouzdanost svakog pojedinog oblika oštećenja (npr. određivanjem indeksa pouzdanosti).
7. Izmijeniti strukturu (projekt) ukoliko pouzdanosti ne odgovaraju traženim pouzdanostima.
8. Vrednovati rezultat pouzdanosti pomoću analize osjetljivosti.

## 5.4 Tipovi neizvjesnosti

U određivanju pouzdanosti je važno definirati sve neizvjesnosti koje se mogu javiti kod projektiranja i uporabe neke konstrukcije. Neizvjesnosti u djelovanju konstrukcija se općenito mogu klasificirati u tri kategorije [2]:

- fizikalne
- znanja (neznanja) i

- ljudske.

Fizikalne neizvjesnosti se odnose na prirodne slučajne vrijednosti varijabli i poznate su i kao objektivne neizvjesnosti ili aleatorne neizvjesnosti. Fizikalne neizvjesnosti se mogu dodatno podijeliti na:

- neizvjesnosti fizikalnih osobina samog tehničkog predmeta i uvjeta u kojima djeluje (npr. fluktuacije parametara čvrstoće među ispitivanim uzorcima ili npr. opterećenja valovima),
- neizvjesnosti mjernih uređaja

Neizvjesnosti znanja su subjektivne i mogu se podijeliti na:

- statističke,
- modelske i
- fenomenološke neizvjesnosti

Statističke neizvjesnosti posljedica su nedovoljne (neadekvatne) količine podataka prikupljenih promatranjem. Modelske neizvjesnosti posljedica su pojednostavljenog tumačenja veza između varijabli i stvarnog ponašanja konstrukcije. Ova dva tipa neizvjesnosti mogu se umanjiti prikupljanjem većeg broja podataka i usvajanjem realističnijih modela.

Fenomenološke ili epistemološke neizvjesnosti postoje zbog moguće pojave neobjašnjivih (ili neočekivanih) fenomena koji mogu izazvati oštećenje ili slom konstrukcije.

Neizvjesnosti koje su posljedica djelovanja tzv. 'ljudskog faktora' najteže je kvantificirati i uključiti u projektni proces. Neizvjesnosti vezane uz ljudske greške uzrokom su više od 50 % strukturnih oštećenja. Može ih se definirati kao devijacije događaja ili proces iz prihvaćene inženjerske prakse.

## 5.5 Tehnike određivanja pouzdanosti

Za određivanje pouzdanosti moguće je primijeniti sljedeće tehnike [2]:

- simulacijske
- analitičke
- transformacijske



U simulacijskim tehnikama upotrebljavaju se slučajni uzorci za određivanje vjerojatnosti, a kod transformacijskih tehnika integrand integrala pouzdanosti transformira se u standardni tip razdiobe koja se onda može analizirati pomoću poznatih svojstava konkretne razdiobe. Definiranje relevantnog oblika oštećenja i odgovarajućih graničnih stanja zajednički su za obje tehnike.

Od simulacijskih tehnika najpoznatija i najčešće upotrebljavana metoda je Monte-Carlo simulacija u raznim varijacijama i poboljšanjima.

U analitičke metode spadaju metode jednostavnog indeksa sigurnosti (Cornellov indeks) te metode First Order Second Moment (FOSM) i Advanced First Order Second Moment (AFOSM).

U transformacijske tehnike spadaju tzv. FORM i SORM (eng. Second Order Reliability Method) postupci. FORM primjenjuje kombinaciju analitičkih i aproksimacijskih metoda i uobičajeno se sastoji od 3 faze:

- sve varijable, neovisno o razdiobi, transformiraju se u ekvivalentni prostor standardnih normalnih varijabli s očekivanjem 0 i varijancom 1, a izvorna ploha graničnog stanja preslikava se u novu plohu graničnog stanja,
- računa se najkraća udaljenost između ishodišta koordinatnog sustava i točke na novoj plohi graničnog stanja (projektna točka). Udaljenost se zove indeks pouzdanosti ( $\beta$ ),
- računa se vjerojatnost oštećenja  $p_f = \Phi(-\beta)$ . Za nelinearne funkcije graničnih stanja, ploha graničnog stanja se linearizira u projektnoj točki, a greška ovisi o veličini nelinearnosti funkcije u toj točki.

FORM tehnika je izbalansirana između lakoće primjene i točnosti i najraširenija je u praktičnoj primjeni. FORM je efikasniji nego Monte-Carlo simulacija u smislu brzine proračuna i zadovoljavajuće točnosti rezultata čak i u slučajevima kada su vjerojatnosti oštećenja vrlo male. Velike greške su moguće ako postoji lokalni minimum ili ako je funkcija graničnog stanja vrlo nelinearna u projektnoj točki. FORM postupak aproksimira funkciju graničnih stanja u projektnoj točki kao pravac što vodi do većih grešaka kod izrazito nelinearnih funkcija. SORM primjenjuje kvadratni polinom ili polinome višeg stupnja za aproksimaciju što rezultira u većoj točnosti, ali komplicira računanje i općenito se smatra nepotrebnim za većinu inženjerskih primjena.

Transformacijskim tehnikama su prethodile analitičke metode koje se označavaju i sa FOSM (eng. First Order Second Moment Reliability Method), odnosno naprednija inačica AFOSM (eng. Advanced First Order Second Moment Reliability Method), gdje se kratica SM odnosi na primjenu statističkih momenata do najviše druge razine (srednje vrijednosti i standardne devijacije).

## 5.6 Racionalni pristup sigurnosti brodskih konstrukcija

Dugo vremena su područjem sigurnosti brodskih konstrukcija dominirali iskustveni postupci. Stalnim primjenama najnovijih dostignuća mehanike i nauke o čvrstoći iskustveni su postupci postali sve više teoretski utemeljeni. Na kraju tako dugog razvojnog puta nužno se nametnuo racionalni pristup sigurnosti brodova.

Problemi racionalnog projektiranja konstrukcija se razmatraju iz dva dijela. Prvi dio problema predstavljaju opterećenja (eng. loads), koja predstavljaju zahtjeve (eng. demands) na konstrukciju, česta kratica je D. Drugi dio problema predstavlja čvrstoća konstrukcije (eng. strength), koja predstavlja izdržljivost (eng. capability) na djelovanja opterećenja, česta kratica je C. Provjera nekog strukturnog dijela se osniva na prepoznavanju opasnih mjesta, načina oštećenja te određivanju značajnih opterećenja i odgovarajućih razina izdržljivosti.

### 5.6.1 Projektne varijable

Za opis svojstava i stanja sigurnosti osnovnih sklopova, podstruktura i cijelih struktura koriste se projektne varijable. Određivanje skupa projektnih varijabli treba biti prvi korak u postupku projektiranja. Prostor projektnih varijabli za određenu strukturu je višedimenzionalni prostor koji predstavlja sva moguća ostvarenja projektnih varijabli.

Projektne varijable mogu biti:

- determinističke, slobodne varijable (eng. deterministic variables)
- slučajne varijable (eng. random variables)

Prema promjenjivosti mogu biti:

- vremenski promjenjive (eng. time variant variables)
- vremenski nepromjenjive (eng. time invariant variables)

Projektne varijable se mogu razmatrati i kao:

- strukturne varijable (glavne izmjere broda, dimenzije osnovnih sklopova, položaj osnovnih sklopova, itd.)
- varijable svojstva materijala (modul elastičnosti, Poissonov omjer, granica popuštanja, itd.)
- varijable za opis djelovanja okoline-opterećenja (pritisci, težine, momenti savijanja, poprečne sile, itd.)

Po složenosti, projektne varijable mogu biti:

- jednostavne (npr. dimenzije osnovnih sklopova i sl.)
- složene (npr. geometrijske karakteristike presjeka)

Po značaju, projektne podatke osim kao projektne varijable dodatno možemo promatrati još i kao:

- parametre (veliĉine koje su posljedica općih projektnih zahtjeva i nisu u nadležnosti projektanata konstrukcije)
- konstante (veliĉine koje po svojim svojstvima ne podliježu promjenama u razmatranju konstrukcije)

Deterministiĉke (slobodne) varijable nemaju sluĉajna svojstva, a koriste se u opisu brodskih konstrukcija u nekom podruĉju vrijednosti. Mogu biti cjelobrojne i kontinuirane. Sluĉajne varijable poprimaju vrijednosti uz odreĊene vjerojatnosti. Pojavljuju se kao diskretne i kontinuirane. Opisuju se parametrima statistiĉkih distribucija, empirijskim distribucijama ili statistiĉkim podacima kao što su aritmetiĉka sredina i standardna devijacija. Strukturne varijable predstavljaju veliĉine kojima se opisuju geometrijska svojstva struktura i njihov položaj u cjelini. Varijable svojstava materijala predstavljaju podatke o mehaniĉkim svojstvima graĊevnih dijelova.

### 5.6.2 Načini oštećenja brodskih konstrukcija

Potrebno je odrediti sva opasna mjesta brodskih konstrukcija i moguće načine oštećenja u njima. Nastajanje pojedinih načina oštećenja se ustanovljava na osnovi kriterija oštećenja. Kriteriji oštećenja se najčešće opisuju funkcijama graničnih stanja (eng. limit state functions). Obično se primjenjuju na opločenja, ukrepljenja, nosače i strukturne detalje.

Stupnjevi ozbiljnosti oštećenja brodskih konstrukcija se ocjenjuju prema posljedicama u:

- gubicima ljudskih života
- nemogućnosti izvršavanja zadataka i materijalnim gubicima

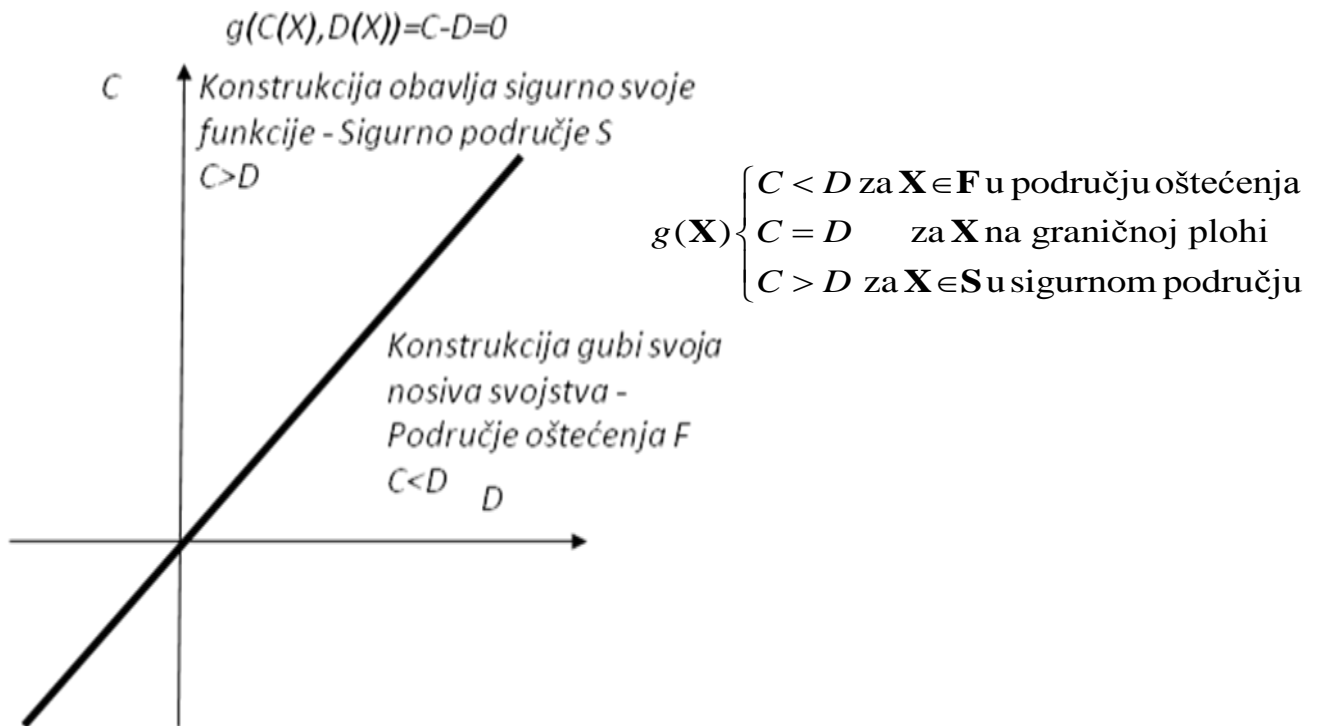
Funkcije graničnih stanja dijele stanja u kojima konstrukcija obavlja odnosno ne obavlja predviđeni zadatak. Funkcije graničnih stanja omogućuju da se svakom načinu oštećenja pridijeli mjera sigurnosti. Funkcije graničnih stanja se definiraju na osnovi projektnih varijabli kao:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Granična ploha u prostoru projektnih varijabli razgraničava pod-prostore u kojima konstrukcija obavlja sigurno svoje funkcije od pod-prostora gdje gubi svoja nosiva svojstva (Slika 5-1). Dogovorno se obično uzima da konstrukcija obavlja zadatak kada je funkcija  $g \geq 0$ , a ne obavlja zadatak kada je  $g < 0$ .

U mnogim slučajevima je pogodno ponašanje konstrukcije izraziti funkcijama koje predstavljaju posebno zahtjeve (opterećenja) na konstrukciju  $D$  i izdržljivost konstrukcije  $C$ , također ovisne o projektnim varijablama. Tada se funkcije graničnih stanja mogu izraziti kao složene funkcije projektnih varijabli, a preko funkcija zahtjeva (opterećenja)  $D$  i izdržljivosti  $C$ :

$$g[C(x_1, x_2, \dots, x_n), D(x_1, x_2, \dots, x_n)] = 0$$



**Slika 5-1 Funkcija graničnog stanja**

Funkcije graničnih stanja se obično određuju na osnovi opće teorije čvrstoće ili teorije brodskih konstrukcija. Kod brodskih konstrukcija nisu tipična oštećenja kao jedan posebno izraženi način oštećenja. Mnogo su češći višestruki načini oštećenja, za koje se obično koriste empirijske funkcije graničnih stanja, pod imenom interakcijske formule.

Najčešći uzroci oštećenja brodskih konstrukcija su [3]:

- pretjerane plastične deformacije (opločenja, ukrepljenja i nosači)
- gubitak nosivosti zbog izvijanja (opločenja, ukrepljenja i nosači)
- lomovi uslijed zamora (strukturni detalji)
- krti lomovi zbog niskih temperatura (strukturni detalji)

## 6 Sigurnost konstrukcija

Sigurnost brodskih konstrukcija se može razmatrati na više načina odnosno razina.

### 6.1 Vjerojatnosni pristup

Elementarnim događajima kod razmatranja sigurnosti brodskih konstrukcija smatraju se pojave oštećenja. Svakom elementarnom događaju pripada neka vjerojatnost nastupanja. Svakom oštećenju potrebno je pridijeliti vjerojatnost oštećenja. Točno određivanje vjerojatnosti oštećenja moguće je na osnovi funkcija razdiobe projektnih varijabli. Takovi potpuni vjerojatnosni pristupi primjenjuju slučajne varijable za opis problema i označavaju se kao postupci treće razine.

Kada se u opisu brodskih konstrukcija nalaze slučajne veličine, postoji mogućnost greške ili pogibelji. Pogibelj se definira kao vjerojatnost da zahtjev D dosegne ili premaši izdržljivost C. Pouzdanost strukturnog dijela se određuje kao vjerojatnost da zahtjev D ne premaši izdržljivost.

Sigurnost cijele strukture je posljedica djelovanja strukturnih dijelova od kojih je sastavljena. Potpunim skupom ili prostorom elementarnih događaja smatraju se sva moguća oštećenja, na svim opasnim mjestima i po svim načinima opterećenja. Svakom elementarnom događaju  $E_i$  pripada vjerojatnost nastupanja  $P(E_i)$ .

Ponašanje konstrukcije kao strukturnog sustava je posljedica interakcije njegovih strukturnih komponenti, a može se razmatrati osnovnom teorijom skupova.

Kod serijskih sustava sve komponente moraju funkcionirati da bi sustav kao cjelina funkcionirao. Ukratko, sustav se smatra oštećenim kada bilo koji dio na bilo koji način pretrpi oštećenja. Kod paralelnih sustava, sve komponente moraju prestati funkcionirati da bi sustav kao cjelina prestao funkcionirati. Barem jedna ispravna komponenta omogućuje funkciju sistema kao cjeline. U naravi se pojavljuju kombinacije serijskih i paralelnih sustava, na koje se također može primijeniti teorija skupova. Svakom načinu oštećenja se može pridijeliti vjerojatnost oštećenja na sljedeći način:

$$p_f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

gdje je  $f$  funkcija gustoće vjerojatnosti združene razdiobe slučajnih varijabli  $X$ , a  $D_f$  je domena integracije koju obično definiraju funkcije graničnih stanja.

Pogibelj se definira kao vjerojatnost da dođe do oštećenja, odnosno da zahtjevi na konstrukciju premaše njezinu izdržljivost:  $p = P(D \geq C) = P[g(X) \leq 0]$

Pouzdanost se tada definira kao vjerojatnost da ne dođe do oštećenja:  $r = 1 - p$

## 6.2 Poluvjerojatnosni pristup

U nedostatku potpunih podataka o statističkim distribucijama projektnih varijabli, pribjegava se rješenjima zasnovanim samo na prvim i drugim statističkim momentima, koji se tada nazivaju poluvjerojatnosnim postupcima, odnosno postupcima druge razine.

Poluvjerojatnosni pristup se primjenjuje u nedostatku potpunih statističkih podataka o razmatranoj pojavi. Zasniva se na primjeni samo prvih i drugih statističkih momenata (aritmetičke sredine i standardne devijacije), a ne i potpunih statističkih razdioba.

Karakteristične mjere sigurnosti u postupcima druge razine su:

- indeksi sigurnosti
- parcijalni faktori sigurnosti

koji u procjeni sigurnosti uzimaju u obzir djelomično znana statistička svojstva brodske konstrukcije i okoline.

## 6.3 Deterministički pristup

Projektni zahtjevi u determinističkom pristupu su skalarne veličine koje se smatraju najnepovoljnijom vrijednošću zahtjeva  $D$  koja se može dogoditi u vijeku korištenja brodske konstrukcije. Izdržljivost  $C$  je također skalarna veličina kojom se određuje granična izdržljivost. Deterministički postupci se označavaju postupcima prve razine.

Postoji više načina izražavanja mjere sigurnosti u determinističkoj projektnoj proceduri.

- Faktor sigurnosti je skalarna veličina koja predstavlja odnos između izdržljivosti  $C$  i projektnog zahtjeva  $D$ :

$$f = \frac{C}{D}$$

Faktor sigurnosti u pravilu treba biti veći od jedan.

Osim toga, postoje i drugi načini za definiranje faktora sigurnosti.

➤ Normalizirani faktori sigurnosti se definiraju kao:

$$f_n = \frac{C-D}{D} = \frac{C}{D} - 1$$

➤ Razlika sigurnosti, odnosno margina sigurnosti:

$$m = C - D$$

Razlika sigurnosti treba biti veća od nula.

➤ Normalizirana razlika sigurnosti:

$$m_n = \frac{C-D}{C+D} = \frac{f-1}{f+1}$$

➤ Iskoristivost izdržljivost:

$$i = \frac{D}{C}$$

Iskoristivost izdržljivosti u pravilu treba biti manja od jedan.



## 7 Proračun pouzdanosti konstrukcije broda za rasute terete

Prva primijenjena i najjednostavnija aproksimacija u procjeni pouzdanosti koja se odnosi na neizvjesne parametre u službi i ulozi konstrukcije broda koristi dobro poznatu teoriju linearne kombinacije normalno distribuiranih slučajnih varijabli. Za normalno distribuirane slučajne varijable  $X_i$  koje su zadane srednjim vrijednostima i očekivanjem, teoremi o linearnoj kombinaciji glase [7]:

Teorem 1 - srednja vrijednost linearnih kombinacija slučajnih varijabli jednaka je zbroju srednjih vrijednosti pojedinih varijabli:

$$E(a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_kX_k) = a_1E(X_1) + a_2E(X_2) + \dots + a_kE(X_k)$$

$$\mu = a_1\mu_1 + a_2\mu_2 + \dots + a_k\mu_k$$

Teorem 2 - varijanca linearnih kombinacija slučajnih varijabli jednaka je zbroju varijanci pojedinih varijabli:

$$\sigma^2 = a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2 + \dots + a_k^2\sigma_k^2$$

Na osnovi teorema o linearnoj kombinaciji postavljene su osnove metode nulte razine kao prvi korak u ocjeni sigurnosti. Nedostatak ovog pristupa je u nužnoj pretpostavci da su sve varijable normalno distribuirane, a funkcije graničnih stanja linearne. Ovaj postupak ne dopušta kombinacije više slučajeva opterećenja.

Centralne mjere sigurnosti poznate kao nulta razina procjene pouzdanosti se baziraju na srednjim vrijednostima varijabli koje definiraju srednju vrijednost izdržljivosti  $\bar{C}$  i srednju vrijednost zahtjeva (opterećenja)  $\bar{D}$  kako slijedi:  $M = \bar{C} - \bar{D}$ ,  $f = \frac{\bar{C}}{\bar{D}}$ ,  $i = \frac{\bar{D}}{\bar{C}}$  umjesto nominalnih vrijednosti kakve se koriste u projektiranju.

Direktna posljedica ove aproksimacije je prvi objavljen Cornellov indeks sigurnosti (Cornell's safety index) 1969. godine - 1.razina, definiran srednjim vrijednostima i varijancama izdržljivosti i zahtjeva kako slijedi:  $\beta_c = \frac{\bar{C} - \bar{D}}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_D^2}}$ .

Na osnovi teorema o linearnoj kombinaciji postavljene su i mogućnosti za složenije funkcije slučajnih varijabli graničnih stanja koje se za te potrebe moraju linearizirati. Za linearnu

funkciju graničnog stanja  $g(x) = -a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i < 0$  i za cijeli skup osnovnih varijabli  $X$ , osnovna metoda koja se koristi za određivanje indeksa sigurnosti se naziva Second Moment (SM) Method odnosno metoda momenata drugog reda, koja ne koristi nikakve statističke distribucije osim statističkih momenata do drugog reda, ali na lineariziranim funkcijama graničnih stanja, kako slijedi:

$$\beta_{SM} = \frac{-a_0 + \sum_i a_i \cdot \bar{x}_i}{\sqrt{\sum_i (a_i \cdot \sigma_{x_i})^2}}.$$

Za nelinearne funkcije graničnih stanja i za cijeli skup osnovnih varijabli, osnovna metoda koja se koristi za određivanje indeksa sigurnosti se naziva First Order Second Moment (FOSM) Method budući da koristi razvoj u prvi Taylorov red (First Order), kako slijedi:

$$\beta_{FOSM} = \frac{-a_0 + \sum_i \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{x_i^*} (\bar{x}_i - x_i)}{\sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial g}{\partial x} \right)_{x^*}^2 \cdot \sigma_x^2}}.$$

Najjednostavnija aproksimacija vjerojatnosti oštećenja prema FOSM-u se dobiva kao inverzna vrijednost standardne normalne funkcije za ranije izračunate indekse sigurnosti kako slijedi:

$$p_f = \Phi^{-1}(-\beta).$$

Ako se linearizira u srednjoj vrijednosti tada se metoda naziva Mean Value First Order Second Moment (MVFOSM). Kako god, rezultati za nelinearne funkcije graničnih stanja ovise o točki u kojoj se linearizira kao i obliku funkcije graničnih stanja.

Veliki je problem ovih metoda nedostatak invarijantnosti rezultata u odnosu na način zadavanja graničnih funkcija.

Zbog toga se moralo pristupiti primjeni transformacijskih metoda pouzdanosti koje ne ovise o definiciji funkcija graničnih stanja. Međutim te metode dovode do složenih numeričkih problema.

Krajnji cilj analize pouzdanosti konstrukcije je procjena mogućnosti oštećenja, definirana kao integral proizvoljne združene distribucije slučajnih varijabli problema sigurnosti preko područja oštećenja u sljedećem općem obliku:

$$p_f = P(g(x) \leq 0) = \iiint_{g(x) \leq 0} f(x) dx.$$

Gornji se zadatak ne može točno riješiti za većinu složenih problema. Za praktične inženjerske postupke gornji se zadatak analitički i numerički rješava primjenom Advanced First Order Reliability Method (AFORM) (3. razina). Metoda koristi linearizaciju prvog reda funkcije graničnih stanja i direktne transformacije izvorne slučajne varijable proizvoljne distribucije u normalnu slučajnu varijablu.

## 7.1 Proračun pouzdanosti na osnovi granične čvrstoće brodskog trupa

Odgovarajuća funkcija graničnog stanja sa slučajnim i determinističkim varijablama prema Guedes-Soaresu [11] glasi:

$$\bar{\chi}_u \cdot \bar{M}_u - \bar{M}_{sw} - \psi \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{\chi}_{nl} \cdot \bar{M}_w < 0$$

Sama se funkcija može prikazati iz dva dijela:

- funkcije zahtjeva na konstrukciju koje obuhvaćaju opterećenja uslijed vertikalnih momenata savijanja brodskog trupa na mirnoj vodi i valovima (eng. demand):

$$\bar{D}(\bar{M}_{sw}, \psi, \bar{\chi}_w, \bar{\chi}_{nl}, \bar{M}_w) = \bar{M}_{sw} + \psi \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{\chi}_{nl} \cdot \bar{M}_w$$

- funkcije izdržljivosti konstrukcije koja predstavlja granični moment savijanja određen nekom od metoda proračuna granične čvrstoće za materijale od kojih je građen trup (eng. capability):

$$\bar{C}(\bar{\chi}_u, \bar{M}_u) = \bar{\chi}_u \cdot \bar{M}_u$$

Gdje su:

$M_u$  - moment sloma brodskog trupa; deterministička (slobodna) varijabla. U ovom slučaju se za  $M_u$  uzimaju rezultati proračuna granične čvrstoće koji su dobiveni računalnim programom *MARS 2000*.

$M_{sw}$  - moment savijanja na mirnoj vodi; slučajna varijabla (obično iz knjige krcanja broda).

$M_w$  - moment savijanja na valovima; slučajna varijabla (najtočniji način proračuna je korištenjem postupaka hidrodinamike). U ovom slučaju se proračun provjerava na osnovi proračuna momenata savijanja brodskog trupa na valovima prema zajedničkim pravilima IACS-a za brodove za rasute terete koji se odnosi na  $10^8$  susreta s valovima u predviđenom vijeku korištenja broda od 30 godina.

$\chi_u, \chi_w, \chi_{nl}$  - slučajne varijable koje predstavljaju neizvjesnosti modeliranja granične čvrstoće materijala i poprečnog momenta otpora trupa, linearnih i nelinearnih valnih opterećenja.

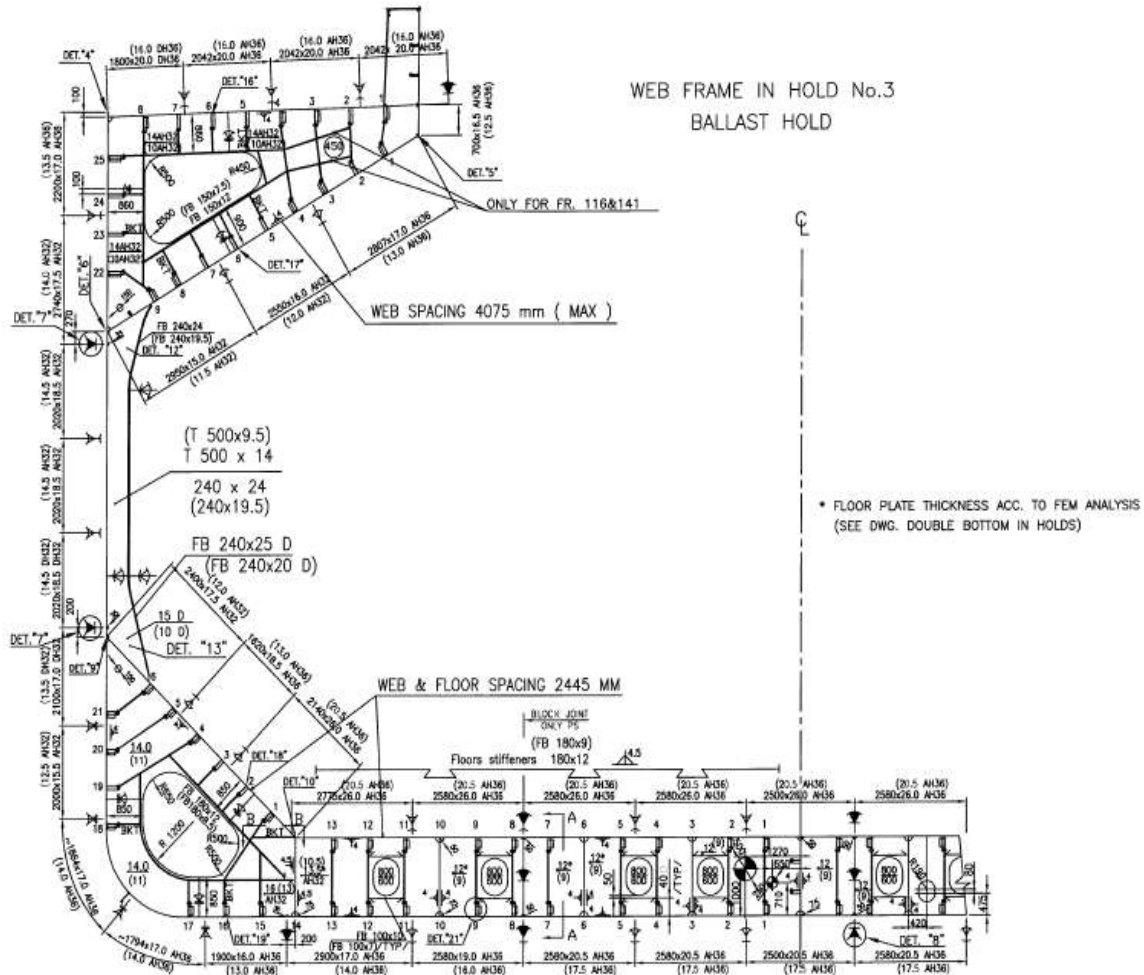
$\psi$  - zajednički faktor kombinacije opterećenja na mirnoj vodi i valovima koji pokazuje koja je mogućnost istovremenog pojavljivanja momenata na mirnoj vodi i na valovima.

Za proračune pouzdanosti koristi se isti primjer broda za prijevoz rasutog tereta kao za proračun granične čvrstoće čije su glavne karakteristike rekapitulirane u Tablici 7-1.

**Tablica 7-1 Glavne karakteristike broda**

Tip broda	Brod za prijevoz rasutog tereta
Proračunska duljina	180.614 m
Širina	32.240 m
Proračunski gaz	12.350 m
Visina	17.100 m
Koeficijent punoće	0.832
Nosivost	51 900 t
Područje plovidbe	Neograničeno

Na Slici 7-1 je prikazano glavno rebro razmatranog broda. Svi elementi koji sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći su izgrađeni od čelika povišene čvrstoće AH 32 i AH 36.



**Slika 7-1      Glavno rebro broda za prijevoz rasutog tereta**

Za racionalnu procjenu pouzdanosti, postotak vremena koji brod provede u svakom od predvidivih stanja krcanja se mora pretpostaviti na temelju iskustva i raspoloživih podataka za određeni tip broda i plovidbene rute. U Tablici 7-2 je prikazan pretpostavljeni radni profil za dobro iskorišteni brod za rasute terete koji vozi na određenoj ruti uvijek u potpuno nakrcanom stanju (Full Load - FL) u jednom smjeru i u balastnom stanju (Ballast Load - BL) u povratku [9].

**Tablica 7-2 Predviđeni radni profil za brod za rasute terete iz ovog zadatka**

Stanje krcanja	Luka	FL	BL
Postotak utrošenog vremena	16 %	42 %	42 %
Utrošeno vrijeme u mjesecima	2	5	5

Na osnovi gornjih podataka (Tablica 7-2) o vremenima broda u službi određen je broj putovanja za jednu godinu službe (Tablica 7-3).

**Tablica 7-3 Broj putovanja u jednoj godini prihvaćen za razmatrani brod za rasute terete**

Stanje krcanja	FL	BL
Broj putovanja	6	6
Trajanje putovanja u mjesecima	0.83 (25 dana)	0.83 (25 dana)

Analiza pouzdanosti se provodi za 2 stanja krcanja: puni brod FL - u stanju progiba i brod u balastu BL - u stanju pregiba. U nastavku će se provesti proračuni i usporedbe rezultata pouzdanosti za jednogodišnju i cjeloživotnu službu broda od 30 godina (Tablice 7-4 do 7-23).

## 7.2 Određivanje opterećenja za proračun pouzdanosti

Prvi dio proračuna se odnosi na određivanje statističkih svojstava opterećenja broda. Proračun pouzdanosti se provodi za uzdužne momente savijanja brodskog trupa koji su posljedica statičkih momenata na mirnoj vodi i dinamičkih utjecaja valova na momente savijanja. Kao što se zna, maksimalni momenti savijanja se javljaju unutar 0.4 duljine broda na sredini i pouzdanost se provjerava u tom području brodskog trupa.

### 7.2.1 Momenti savijanja na mirnoj vodi

Na osnovi ispitivanja u naravi pretpostavljaju se ista statistička svojstva za brodove istog tipa. Osim toga, smatra se i da se unutar razmatranih tipova treba izvršiti grupiranje po veličinama tako da se odrede grupe sličnih statističkih svojstava. Momenti savijanja na mirnoj vodi se mogu smatrati statistički neovisnim veličinama. Općenito se smatra da normalni zakon razdiobe odgovara za prikaz statističkih svojstava opterećenja na mirnoj vodi za jedno putovanje za većinu stanja krcanja. Statistički podaci o iskoristivosti čvrstoće broskog trupa na uzdužno savijanje su prikazani u Tablici 7-4 [10]. Kod brodova za rasuti teret najveća opterećenja na mirnoj vodi se pojavljuju u stanjima krcanja koja izazivaju pregib.

**Tablica 7-4 Statistička svojstva momenata savijanja brodova za rasute terete na mirnoj vodi za jedno putovanje prema najvećim dozvoljenim vrijednostima**

Vrsta broda	Stanje	Momenti savijanja		
		Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	Koeficijent varijacije (COV)
Rasuti teret	Progib	28.47%	19.88%	70%
Rasuti teret	Pregib	-34%	20.04%	-60%

Za razmatrani brod maksimalni dopušteni momenti savijanja na mirnoj vodi koji vrijede za 30 godina službe su preuzeti iz brodske knjige krcanja i stabiliteta i iznose:

Progib: 1275 MNm

Progib: -1275 MNm

Na osnovi gornjih podataka određeni su statistički podaci za momente savijanja na mirnoj vodi za stanja trupa u progibu i pregibu za jedno putovanje (Tablica 7-5)

**Tablica 7-5 Izračunata statistička svojstva momenata savijanja na mirnoj vodi prema najvećim dozvoljenim vrijednostima za jedno putovanje**

Vrsta broda	Stanje	Momenti savijanja		
		Srednja vrijednost, MNm	Standardna devijacija ( $\sigma$ ), MNm	Koeficijent varijacije (COV)
Rasuti teret	Progib	363	254	70%
Rasuti teret	Pregib	433	260	-60%

### 7.2.2 Ograničavanja opterećenja na mirnoj vodi

Na mnogim brodovima se koriste uređaji za provjeru opterećenja na mirnoj vodi kojima se omogućuje ograničavanje na dozvoljene veličine. Najstariji i najjednostavniji način je preko znakova za ograničenje gazova na bokovima broda kojima se ograničava nosivost i lateralni pritisci na oplati. Osim toga primijenjuju se i složeniji uređaji koji određuju opterećenja za sva stanja krcanja. U novije vrijeme to rade i elektronička računala prilagođena za brodske uvjete. Imajući u vidu mogućnost da se opterećenja na mirnoj vodi stalno drže u granicama dozvoljenih, moraju se prilagoditi i statistička svojstva [10]. Tako se obično vrši ograničavanje opsega funkcija razdiobe i funkcija gustoće vjerojatnosti čime se dobivaju krnje razdiobe.

### 7.2.3 Opterećenja na mirnoj vodi za više putovanja

Kako su statistička svojstva prevladavanja nekog opterećenja na mirnoj vodi „x“ u jednom putovanju predstavljena funkcijom razdiobe  $F_x(1)$  i funkcijom gustoće vjerojatnosti  $f_x(1)$ , potrebno je odrediti i statistička svojstva u vijeku korištenja broda, u kojemu će se ostvariti „n“ putovanja. Smatrajući da svakom putovanju pripada jednaka vjerojatnost da opterećenje „x“ premaši dozvoljenu granicu koja iznosi  $F_x(1)$ , može se odrediti za „n“ putovanja kao binomnom procesu:

$$F_x(n) = 1 - [1 - F_x(1)]^n$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti se određuje kako slijedi:

$$f_x(n) = n \cdot [1 - F_x(1)]^{n-1} \frac{dF_x(1)}{dX}$$

Određivanjem statističkih momenata funkcija gustoće vjerojatnosti dobivaju se podaci potrebni u poluvjerojatnosnom postupku određivanja pouzdanosti. Iskustvo pokazuje da se gornje distribucije za n ponavljanja dobro poklapaju s Gumbelovom distribucijom (Tablice 7-8 i 7-9, Slika 7-2 u nastavku) [10].

Parametri Gumbelove distribucije (Tip I najveće vrijednosti):

$$f(x) = \beta \cdot e^{-(x-m)/\beta} \cdot e^{-e^{-(x-m)/\beta}} \quad F(x) = e^{-e^{-(x-m)/\beta}}$$



$$\mu = m + \beta \ln(\ln 2)$$

$$m = \mu - \sigma \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln(\ln 2) = \mu - 0.5772 \cdot \beta$$

$$\sigma = \frac{\beta \cdot \pi}{\sqrt{6}}$$

$$\beta = \sigma \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

U Tablicama 7-6 i 7-7 su prikazani rezultati proračuna za jedno i šest putovanja, relativno prema dozvoljenom momentu savijanja na mirnoj vodi (vrijednost 1) s ograničenjem na maksimalnu vrijednost 1 i minimalnu vrijednost 0. Opterećenja na mirnoj vodi za jedno putovanje se prikazuju normalnom razdiobom.

**Tablica 7-6 Opterećenja na mirnoj vodi prema dozvoljenim opterećenjima za jedno i šest putovanja - progib**

Broj putovanja N	Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	Koeficijent varijacije (COV)
1	0.285	0.199	0.700
6	0.583	0.093	0.160

**Tablica 7-7 Opterećenja na mirnoj vodi prema dozvoljenim opterećenjima za jedno i šest putovanja - pregib**

Broj putovanja N	Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	Koeficijent varijacije (COV)
1	0.340	0.200	0.600
6	0.626	0.102	0.163

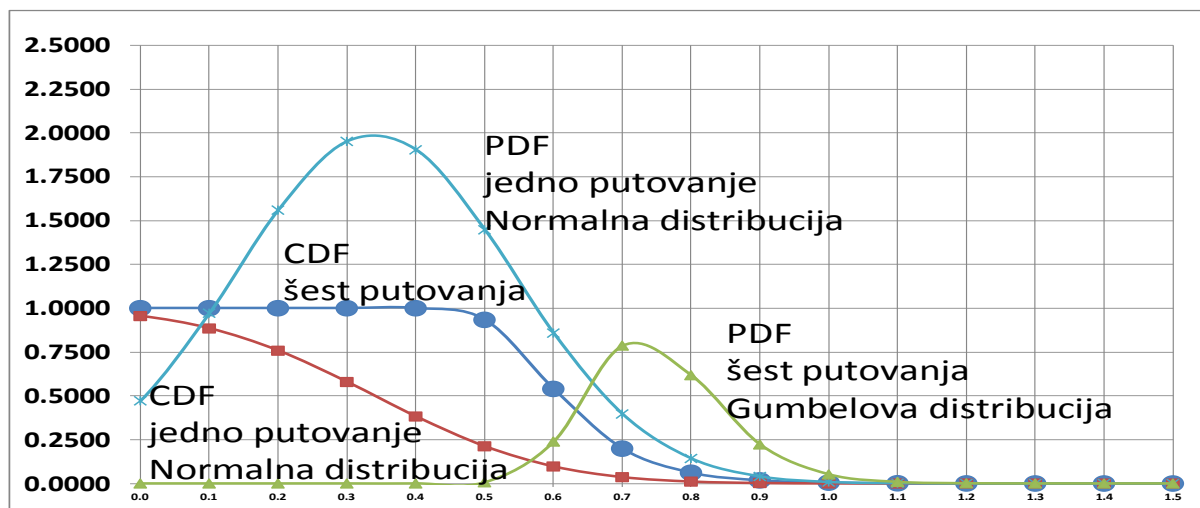
Na osnovi gornjih podataka određeni su statistički podaci za momente savijanja na mirnoj vodi za stanja trupa u progibu i pregibu za jedno i šest putovanja (Tablice 7-8 i 7-9).

**Tablica 7-8 Statistička svojstva momenata savijanja brodova za rasute terete na mirnoj vodi prema najvećim dozvoljenim vrijednostima za 1 i 6 putovanja - progib**

Broj putovanja N	Srednja vrijednost, MNm	Standardna devijacija ( $\sigma$ ), MNm	Koeficijent varijacije (COV)	Parametri Gumbelove distribucije	
				$\beta$	m
1	363	253	0.700	197.829	249.188
6	743	119	0.160	92.453	689.961

**Tablica 7-9 Statistička svojstva momenata savijanja brodova za rasute terete na mirnoj vodi prema najvećim dozvoljenim vrijednostima za 1 i 6 putovanja - pregib**

Broj putovanja N	Srednja vrijednost MNm	Standardna devijacija ( $\sigma$ ), MNm	Koeficijent varijacije (COV)	Parametri Gumbelove distribucije	
				$\beta$	m
1	434	256	0.600	199	319
6	798	130	0.163	101.400	739.622

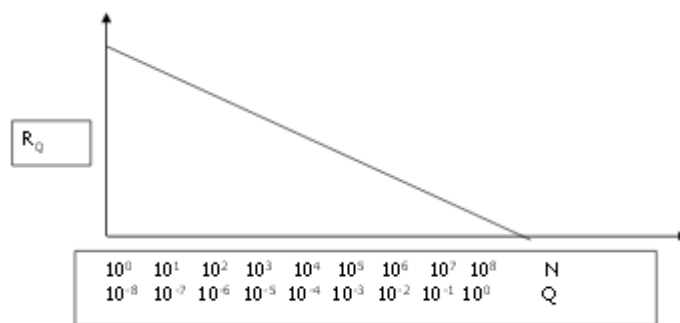


**Slika 7-2 Raspodjela opterećenja uslijed momenata na mirnoj vodi za 1 i 6 putovanja**

#### 7.2.4 Momenati savijanja na valovima

Momenti savijanja na valovima se mogu s prihvatljivom točnošću određivati na osnovi dugoročnih prognoza koje su posljedica plovljenja broda u određenim zonama plovidbe

Dugoročni dinamički odzivi za veće brodove u oceanskim uvjetima mogu se prikazati kao na Slici 7-3:



**Slika 7-3 Dugoročni dinamički odzivi za veće brodove**

N - broj susreta s valovima

Q - vjerojatnost premašivanja odziva/opterećenja

$R_Q$  - dinamički odziv za zadanu razinu vjerojatnosti premašivanja Q

Momenti savijanja u ovom radu se ne određuju na osnovi hidrodinamičkih proračuna. Oni se određuju na osnovi IACS-ovih pravila i odnose se na dugoročne prognoze premašivanja u jednom od  $10^8$  susreta s valovima u Sjevernom Atlantiku zimi, što vrijedi za neograničene uvjete plovidbe (Tablica 7-10).

$M_{w,h} = 0.19 \cdot L^2 \cdot B \cdot C_w \cdot C_b$  - moment savijanja za brodski trup u pregibu

$M_{w,s} = 0.11 \cdot L^2 \cdot B \cdot C_w (C_b + 0.7)$  - moment savijanja za brodski trup u progibu

$C_w = 10,75 - [(300 - L)/100]^{3/2}$  - valni koeficijent za  $100 < L < 300$

**Tablica 7-10 Opterećenja na valovima za stanja pregiba i progiba broskog trupa na osnovi zajedničkih pravila IACS- a za brodove za rasute terete za 30 godina službe**

Momenti savijanja na valovima prema IACS-u za 30 godina ( $N=10^8$ , $Q=10^{-8}$ )			
$M_{w,h}$	Pregib	1570	MNm
$M_{w,s}$	Progib	1674	MNm

Budući da se u radu provjerava indeks sigurnosti za jednu godinu; na osnovi gornjih podataka će se izvršiti preračunavanje momenata savijanja na valovima na vrijeme korištenja broda u jednoj godini. Dakle, pretpostavka je da će biti po 6 putovanja u FL-u (progibu) i BL-u (pregibu) u jednoj godini korištenja broda. Za potrebe ovog rada pretpostavit će se eksponencijalna empirička razdioba dugoročnih predviđanja premašivanja vertikalnog

momenta savijanja na valovima kao na Slici 7-3 sa sljedećim parametrima:  $R_q = M \cdot \log Q$  i  $M = R_{10^8} / \log Q_0$ .

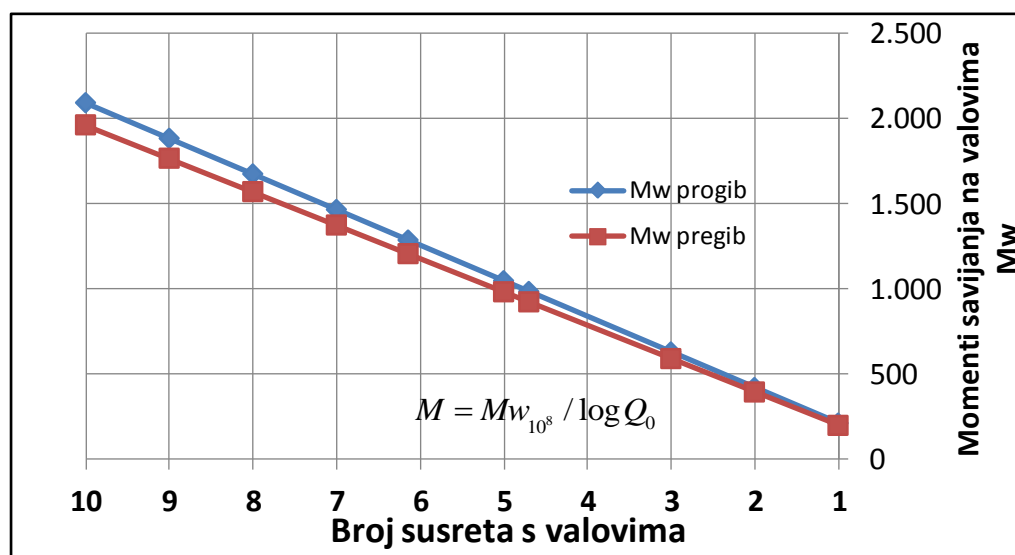
Ova se iskustvena eksponencijalna distribucija može prikazati s Gumbelovom distribucijom (vidjeti parametre u 7.2.2.3) i to prilagođavanjem teoretske distribucije empiričkim podacima korištenjem metode najmanjih kvadrata i rješavača jednadžbi Generalized Reduced Gradient-a (GRG-a) u programu MS Office Excel.

Rezultati proračuna opterećenja na valovima za stanja pregiba i progiba broskog trupa za jednu godinu korištenja (šest putovanja u pet mjeseci) broda odnosno za  $N=1.39 \cdot 10^6$  ciklusa predočeni su u Tablici 7-11.

**Tablica 7-11 Opterećenja na valovima za stanja pregiba i progiba broskog trupa na osnovi zajedničkih pravila IACS- a za brodove za rasute terete za 1 godinu službe**

Momenti savijanja na valovima prema IACS-u za 1 godinu ( $N=1.39 \cdot 10^6$ , $Q=7.2 \cdot 10^{-7}$ )			
$M_{w,h}$	Pregib	1053	MNm
$M_{w,s}$	Progib	1123	MNm

Na Slici 7-4 je prikazano dugoročno predviđanje momenata savijanja za pregib i progib.



**Slika 7-4 Dugoročno predviđanje momenata savijanja za pregib i progib**

### 7.3 Proračun pouzdanosti za razmatrani brod

Proračun će se prvenstveno provesti za jednu godinu službe (6 putovanja u 5 mjeseci za svako stanje krcanja i  $1.39 \cdot 10^6$  ciklusa susreta s valovima). Za usporedbu će se dodatno provesti proračun i za cijeli životni vijek broda od 30 godina i  $10^8$  ciklusa susreta s valovima.

#### 7.3.1 Ulazni podaci za cijeli životni vijek broda

U Tablicama 7-12 i 7-13 su prikazani ulazni podaci potrebni za proračun pouzdanosti za cijeli životni vijek broda (30 godina službe).

**Tablica 7-12 Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za BL (pregib) - 30 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Nominalna vrijednost	Jedinica	Odstupanje	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)
$M_u$	Deterministic	5210	MNm	0	5210	0
$M_{sw}$	Gumbel	1275	MNm	0	1275	0.10
$M_w$	Gumbel	1570	MNm	0	1570	0.09
$\chi_u$	Log-normal	1		0.14	1.14	0.15
$\chi_w$	Normal	1		-0.10	0.90	0.15
$\chi_{nl}$	Normal	1		-0.05	0.95	0.15
$\psi$	Deterministic	0.95		0	0.95	0

**Tablica 7-13 Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za FL (progib) - 30 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Nominalna vrijednost	Jedinica	Odstupanje	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)
$M_u$	Deterministic	3709	MNm	0	3709	0
$M_{sw}$	Gumbel	1275	MNm	0	1275	0.10
$M_w$	Gumbel	1674	MNm	0	1674	0.09
$\chi_u$	Log-normal	1		0.14	1.14	0.15
$\chi_w$	Normal	1		-0.10	0.90	0.15
$\chi_{nl}$	Normal	1		-0.05	0.95	0.15
$\psi$	Deterministic	0.95		0	0.95	0

### 7.3.2 Ulazni podaci za jednu godinu službe

Kako se u radu provjerava indeks sigurnosti za jednu godinu, proračun će se provoditi za šest putovanja u FL-u odnosno progibu i 6 putovanja u BL-u odnosno pregibu. Rezultati za jednogodišnju službu se često koriste u literaturi kao temelj za usporedbe pouzdanosti. U Tablicama 7-14 i 7-15 su prikazani ulazni podaci potrebni za proračun pouzdanosti za jednu godinu službe.

**Tablica 7-14 Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za BL (pregib) - 1 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Nominalna vrijednost	Jedinica	Odstupanje	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)
$M_u$	Deterministic	5210	MNm	0	5210	0
$M_{sw}$	Gumbel	798	MNm	0	798	0.10
$M_w$	Gumbel	1053	MNm	0	1053	0.09
$\chi_u$	Log-normal	1		0.14	1.14	0.15
$\chi_w$	Normal	1		-0.10	0.90	0.15
$\chi_{nl}$	Normal	1		-0.05	0.95	0.15
$\psi$	Deterministic	0.95		0	0.95	0

**Tablica 7-15 Ulazni podaci za proračun pouzdanosti za FL (progib) - 1 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Nominalna vrijednost	Jedinica	Odstupanje	Srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)
$M_u$	Deterministic	3709	MNm	0	3709	0
$M_{sw}$	Gumbel	743	MNm	0	743	0.10
$M_w$	Gumbel	1123	MNm	0	1123	0.09
$\chi_u$	Log-normal	1		0.14	1.14	0.15
$\chi_w$	Normal	1		-0.10	0.90	0.15
$\chi_{nl}$	Normal	1		-0.05	0.95	0.15
$\psi$	Deterministic	0.95		0	0.95	0

## 7.4 Proračun pouzdanosti po FOSM postupku

Razvoj funkcije graničnog stanja sastavljene od izdržljivosti  $C$  i opterećenja  $D$  u prvi red Taylorova razvoja u srednjoj vrijednosti slučajnih varijabli za potrebe FOSM postupka glasi:

$$g(C, D) \approx g(C, D)_{\bar{x}} + \frac{\partial g(C, D)}{\partial C}(C - \bar{C}) + \frac{\partial g(C, D)}{\partial D}(D - \bar{D})$$

U nastavku je prikazano kako se dolazi do podataka potrebnih za izračunavanje indeksa sigurnosti korištenjem parcijalnih derivacija funkcije graničnih stanja po pojedinoj slučajnoj varijabli, kako slijedi:

1) Granična funkcija glasi:

$$g(\bar{C}, \bar{D}) = \bar{\chi}_u M_u - \bar{M}_{sw} - \psi \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{\chi}_{nl} \cdot \bar{M}_w, \text{ gdje su:}$$

$$\bar{C}(\bar{\chi}_u, M_u) = \bar{\chi}_u \cdot M_u$$

$$\bar{D}(\bar{M}_{sw}, \psi, \bar{\chi}_w, \bar{\chi}_{nl}, \bar{M}_w) = \bar{M}_{sw} + \psi \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{\chi}_{nl} \cdot \bar{M}_w$$

2) Potrebne derivacije se računaju na sljedeći način:

$$\frac{\partial g(C, D)}{\partial \bar{\chi}_u} = M_u, \quad \frac{\partial g(C, D)}{\partial M_u} = \bar{\chi}_u$$

$$\frac{\partial g(C, D)}{\partial \bar{M}_{sw}} = -1, \quad \frac{\partial g(C, D)}{\partial \bar{M}_u} = -\psi \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{\chi}_{nl}$$

$$\frac{\partial g(C, D)}{\partial \psi} = -\bar{M}_w \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{\chi}_{nl}, \quad \frac{\partial g(C, D)}{\partial \bar{\chi}_w} = -\psi \cdot \bar{M}_w \cdot \bar{\chi}_{nl}$$

$$\frac{\partial g(C, D)}{\partial \bar{\chi}_{nl}} = -\psi \cdot \bar{\chi}_w \cdot \bar{M}_w$$

3) Standardne devijacije:

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \bar{\chi}_u}\right)^2 \cdot \sigma_{\bar{\chi}_u}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \bar{M}_u}\right)^2 \cdot \sigma_{\bar{M}_u}^2}$$

$$\sigma_D = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \bar{M}_{sw}}\right)^2 \cdot \sigma_{\bar{M}_{sw}}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \bar{M}_w}\right)^2 \cdot \sigma_{\bar{M}_w}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \psi}\right)^2 \cdot \sigma_{\psi}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \bar{\chi}_w}\right)^2 \cdot \sigma_{\bar{\chi}_w}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \bar{\chi}_{nl}}\right)^2 \cdot \sigma_{\bar{\chi}_{nl}}^2}$$

#### 7.4.1 Proračun pouzdanosti FOSM postupkom za 30 godina službe

Na osnovi ulaznih podataka iz 7.3.1 odnosno Tablica 7-12 i 7-13 slijedi proračun za 30 godina službe.

U Tablicama 7-16 i 7-17 prikazani su izračunati podaci potrebni za određivanje indeksa sigurnosti FOSM postupkom za 30 godina službe.

**Tablica 7-16 Izračunati podaci za BL (pregib) potrebni za  $\beta_{FOSM}$  - 30 godina službe**

Varijanca ( $\sigma^2$ )	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	$\frac{dD}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2}$	$\frac{dC}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2}$
0	0	0	0	0	1.14	0	0
16256.25	127.50	1	16256.25	127.50	0	0	0
19965.69	141.30	0.81	13172.37	114.77	0	0	0
0.03	0.17	0	0	0	5210.00	793720.63	890.91
0.02	0.14	1416.93	36589.90	191.28	0	0	0
0.02	0.14	1342.35	36589.90	191.28	0	0	0
0	0	1342.35	0	0	0	0	0
			$\Sigma =$ 102608.42				$\Sigma =$ 793720.63

**Tablica 7-17 Izračunati podaci za FL (progib) potrebni za  $\beta_{FOSM}$  - 30 godina službe**

Varijanca ( $\sigma^2$ )	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	$\frac{dD}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2}$	$\frac{dC}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2}$
0	0	0	0	0	1.14	0	0
16256.25	127.50	1	16256.25	127.50	0	0	0
22698.44	150.66	0.81	14975.29	122.37	0	0	0
0.03	0.17	0	0	0	3709.00	402259.11	634.24
0.02	0.14	1510.79	41598.04	203.96	0	0	0
0.02	0.14	1431.27	41598.04	203.96	0	0	0
0	0	1431.27	0	0	0	0	0
			$\Sigma =$ 114427.62				$\Sigma =$ 402259.11



### 7.4.2 Proračun pouzdanosti FOSM postupkom za jednu godinu službe

Na osnovi ulaznih podataka iz 7.3.2 odnosno Tablica 7-14 i 7-15 slijedi proračun za jednu godinu službe.

U Tablicama 7-18 i 7-19 prikazani su izračunati podaci potrebni za određivanje indeksa sigurnosti FOSM postupkom za jednu godinu službe.

**Tablica 7-18 Izračunati podaci za BL (pregib) potrebni za  $\beta_{FOSM}$  - 1 godina službe**

Varijanca ( $\sigma^2$ )	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	$\frac{dD}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2}$	$\frac{dC}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2}$
0	0	0	0	0	1.14	0	0
6368.04	79.80	1	6368.04	79.80	0	0	0
8981.35	94.77	0.81	5925.45	76.98	0	0	0
0.03	0.17	0	0	0	5210.00	793720.63	890.91
0.02	0.14	950.33	16459.58	128.29	0	0	0
0.02	0.14	900.32	16459.58	128.29	0	0	0
0	0	900.32	0	0	0	0	0
			$\Sigma =$ 45212.64			$\Sigma =$ 793720.63	

**Tablica 7-19 Izračunati podaci za FL (progib) potrebni za  $\beta_{FOSM}$  - 1 godina službe**

Varijanca ( $\sigma^2$ )	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	$\frac{dD}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dD}{dx}\right)^2}$	$\frac{dC}{dx}$	$\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2$	$\sqrt{\left(\sigma \cdot \frac{dC}{dx}\right)^2}$
0	0	0	0	0	1.14	0	0
5520.49	74.30	1	5520.49	74.30	0	0	0
10215.14	101.07	0.81	6739.44	82.09	0	0	0
0.03	0.17	0	0	0	3709.00	402259.11	634.24
0.02	0.14	1013.51	18720.67	136.82	0	0	0
0.02	0.14	960.17	18720.67	136.82	0	0	0
0	0	960.17	0	0	0	0	0
			$\Sigma =$ 49701.28			$\Sigma =$ 402259.11	

Indeks sigurnosti prema FOSM proceduri  $\beta_{FOSM}$  jednak je Cornellovom indeksu  $\beta_C$  te se računaju kako slijedi:

$$\beta_{FOSM} = \beta_C = \frac{\bar{C} - \bar{D}}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}}$$

### 7.4.3 Pregled rezultata dobivenih FOSM postupkom

U nastavku su prikazani rezultati proračuna indeksa sigurnosti prema FOSM postupku ( $\beta_{\text{FOSM}}$ ) za 30 godina i za jednu godinu službe.

a) za BL – pregib

30 godina (180 putovanja)

1 godina (6 putovanja)

C-D=	3389.1675
$\sigma^2=$	896329.0501
$\sigma=$	946.7466
$\beta_{\text{FOSM}}=$	3.5798
R=	0.9998
$P_F=$	1.72E-04

C-D=	4286.1008
$\sigma^2=$	838933.2726
$\sigma=$	915.9330
$\beta_{\text{FOSM}}=$	4.6795
R=	1.0000
$P_F=$	1.44E-06

b) za FL – progib

30 godina (180 putovanja)

1 godina (6 putovanja)

C-D=	1593.5535
$\sigma^2=$	516686.7329
$\sigma=$	718.8092
$\beta_{\text{FOSM}}=$	2.2169
R=	0.9867
$P_F=$	1.33E-02

C-D=	2573.1033
$\sigma^2=$	451960.3888
$\sigma=$	672.2800
$\beta_{\text{FOSM}}=$	3.8274
R=	0.9999
$P_F=$	1.00E-04

## 7.5 Proračun pouzdanosti po AFORM postupku

Advanced First Order Reliability Method (AFORM) koristi linearizaciju prvog reda funkcije graničnih stanja i direktne transformacije izvorne slučajne varijable proizvoljne distribucije u normalnu slučajnu varijablu .

Varijable se u ovom primjeru odnose na normalne, log-normalne i Gumbelovu distribuciju te se transformiraju na sljedeći način [9]:

*Normalne distribucije:*

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2} \quad \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

*Transformacije standardne normalne distribucije:*

$$u = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad \text{odnosno} \quad x = u\sigma + \mu \quad \sigma > 0$$

*Log - normalne distribucije:*

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2} \quad F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)$$

*Transformacije log - normalne distribucije:*

$$u = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}, \quad \mu_y = \ln\left[\frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2 + \mu_x^2}\right], \quad \sigma_y = \sqrt{\ln\left[1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}\right]}$$

$$\mu_x = e^{\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}}, \quad \sigma_x = e^{\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}} \sqrt{e^{\sigma_y^2} - 1}, \quad u = \frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}, \quad x = e^{u\sigma_y + \mu_y}.$$

*Gumbelova distribucija (Tip I najveće vrijednosti):*

$$f(x) = \beta \cdot e^{-(x-m)/\beta} \cdot e^{-e^{-(x-m)/\beta}} \quad F(x) = e^{-e^{-(x-m)/\beta}}$$

Transformacije Gumbelove distribucije (Tip I najveće vrijednosti):

$$\mu = m + \beta \ln(\ln 2) \qquad m = \mu - \sigma \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln(\ln 2) = \mu - 0.5772 \cdot \beta$$

$$\sigma = \frac{\beta \cdot \pi}{\sqrt{6}} \qquad \beta = \sigma \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

$$x = m - \beta \cdot \ln\{-\ln[\Phi(u)]\}$$

### 7.5.1 Proračun pouzdanosti AFORM postupkom za 30 godina službe

U Tablicama 7-20 i 7-21 su prikazani podaci dobiveni transformacijom varijabli za BL (pregib) te za FL (progib) za 30 godina službe.

**Tablica 7-20 Transformacija varijabli za BL (pregib) brodskog trupa - 30 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	u	Parametar $m$	Parametar $\beta$	Varijabla x	$F_i(u)$
$M_u$	Deterministic	5210.00	0.00	0.0000	5210.00	0.00	5210.00	0.50
$M_{sw}$	Gumbel	1275.00	127.50	0.9178	1217.62	99.41	1378.77	0.82
$M_w$	Gumbel	1570.00	141.30	1.6904	1506.41	110.17	1844.36	0.95
$\chi_u$	Log-normal	1.14	0.17	-3.1382	0.12	0.15	0.71	0.10
$\chi_w$	Normal	0.90	0.14	1.5924	0.90	0.14	1.11	0.94
$\chi_{nl}$	Normal	0.95	0.14	1.5924	0.95	0.14	1.18	0.94
$\psi$	Deterministic	0.95	0.00	0.0000	0.95	0.00	0.95	0.50

**Tablica 7-21 Transformacija varijabli za FL (progib) brodskog trupa - 30 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	u	Parametar $m$	Parametar $\beta$	Varijabla x	$F_i(u)$
$M_u$	Deterministic	3709.00	0.00	0.0000	3709.00	0.00	3709.00	0.50
$M_{sw}$	Gumbel	1275.00	127.50	0.5351	1217.62	99.41	1321.59	0.70
$M_w$	Gumbel	1674.00	150.66	0.7157	1606.20	117.47	1759.74	0.76
$\chi_u$	Log-normal	1.14	0.17	-1.8282	0.12	0.15	0.86	0.36
$\chi_w$	Normal	0.90	0.14	0.9421	0.90	0.14	1.03	0.83
$\chi_{nl}$	Normal	0.95	0.14	0.9421	0.95	0.14	1.08	0.83
$\psi$	Deterministic	0.95	0.00	0.0000	0.95	0.00	0.95	0.50

### 7.5.2 Proračun pouzdanosti AFORM postupkom za jednu godinu službe

U Tablicama 7-22 i 7-23 su prikazani podaci dobiveni transformacijom varijabli za BL (pregib) te za FL (progib) za jednu godinu službe.

**Tablica 7-22 Transformacija varijabli za BL (pregib) broskog trupa - 1 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	u	Parametar $m$	Parametar $\beta$	Varijabla x	$F_i(u)$
$M_u$	Deterministic	5210.00	0.00	0.0000	5210.00	0.00	5210.00	0.50
$M_{sw}$	Gumbel	798.00	79.80	0.8446	762.09	62.22	855.70	0.80
$M_w$	Gumbel	1053.00	94.77	3.3963	1010.35	73.89	1600.15	1.00
$\chi_u$	Log-normal	1.14	0.17	-4.1056	0.12	0.15	0.61	0.04
$\chi_w$	Normal	0.90	0.14	2.2557	0.90	0.14	1.20	0.99
$\chi_{nl}$	Normal	0.95	0.14	2.2557	0.95	0.14	1.27	0.99
$\psi$	Deterministic	0.95	0.00	0.0000	0.95	0.00	0.95	0.50

**Tablica 7-23 Transformacija varijabli za FL i progib broskog trupa - 1 godina službe**

Varijabla	Distribucija	Srednja vrijednost	Standardna devijacija ( $\sigma$ )	u	Parametar $m$	Parametar $\beta$	Varijabla x	$F_i(u)$
$M_u$	Deterministic	3709.00	0.00	0.0000	3709.00	0.00	3709.00	0.50
$M_{sw}$	Gumbel	743.00	74.30	0.7134	709.56	57.93	785.09	0.76
$M_w$	Gumbel	1123.00	101.07	2.0954	1077.51	78.80	1393.08	0.98
$\chi_u$	Log-normal	1.14	0.17	-3.1925	0.12	0.15	0.70	0.09
$\chi_w$	Normal	0.90	0.14	1.7700	0.90	0.14	1.14	0.96
$\chi_{nl}$	Normal	0.95	0.14	1.7700	0.95	0.14	1.20	0.96
$\psi$	Deterministic	0.95	0.00	0.0000	0.95	0.00	0.95	0.50

Proračun po AFORM postupku programiran je u MS-Office EXCEL programu. Koristi se General Reduced Gradient (GRG) optimizacijski postupak u sljedećem obliku:

Naći  $\beta_{min}$  kao najmanju udaljenost granične plohe od ishodišta u prostoru jediničnih normalnih varijabli  $u$ :

$$\beta = \sum_{i=1}^N u_i^2$$

Korištenjem opće transformacije:

$$x_i = F_i^{-1}[\Phi(u_i)], \quad \text{za sve } i$$

Sa sljedećim ograničenjem:

$$g(x) = 0$$

### 7.5.3 Pregled rezultata dobivenih AFORM postupkom

U nastavku su prikazani rezultati proračuna indeksa sigurnosti prema AFORM postupku ( $\beta_{\text{AFORM}}$ ) za 30 godina i za jednu godinu službe.

a) za BL i pregib

30 godina (180 putovanja)

C=	3677.9838
D=	3677.9838
g=	0.0000
$\beta_{\text{AFORM}}$ =	4.3151
R=	1.0000
$p_f$ =	7.98E-06

1 godina (6 putovanja)

C=	3183.7600
D=	3183.7600
g=	0.0000
$\beta_{\text{AFORM}}$ =	6.2674
R=	1.0000
$p_f$ =	1.80E-10

b) za FL i progib

30 godina (180 putovanja)

C=	3183.4418
D=	3183.4418
g=	0.0000
$\beta_{\text{AFORM}}$ =	2.4322
R=	0.9925
$p_f$ =	7.50E-03

1 godina (6 putovanja)

C=	2597.2245
D=	2597.2245
g=	0.0000
$\beta_{\text{AFORM}}$ =	4.6215
R=	1.0000
$p_f$ =	1.91E-06

## 7.6 Usporedba rezultata proračuna FOSM i AFORM postupcima

U ovom dijelu će se ispitati računske neizvjesnosti primjenom dva različita postupka analize pozdanosti brodskog trupa. Usporedbom FOSM i AFORM rezultata uočavaju se razlike u rezultatima proračuna indeksa sigurnosti za oba stanja krcanja, kao što se vidi u Tablici 7-24:

**Tablica 7-24 Usporedba rezultata proračuna indeksa sigurnosti i vjerojatnosti oštećenja za FL i BL; za 30 godina i za 1 godinu službe**

Stanje krcanja	BL (pregib)		FL (progib)	
	30 godina	1 godina	30 godina	1 godina
$\beta_{FOSM}=\beta_C$	3.58	4.68	2.22	3.83
$p_{f\ FOSM}$	1.72E-04	1.44E-06	1.33E-02	1.00E-04
$\beta_{AFORM}$	4.32	6.27	2.43	4.62
$p_{f\ AFORM}$	7.98E-06	1.80E-10	7.50E-03	1.91E-06

Razlike su posljedica zanemarivanja stvarnih funkcija distribucija slučajnih varijabli i linearizacije funkcije ograničenja u FOSM postupku. Zbog evidentnih prednosti u točnosti proračuna u nastavku će se analize oslanjati na AFORM rezultate.

## 7.7 Parametarska analiza utjecaja svojstava ugrađenih materijala na pouzdanost brodskog trupa

U ovom dijelu je provedena parametarska studija utjecaja statističkih svojstava materijala na pouzdanost brodskoga trupa.

Za pet vrijednosti koeficijenta varijacije za dvije vrijednosti odstupanja, provedeni su AFORM proračuni pouzdanosti. Proračun je proveden za oba stanja krcanja u 30 godina službe i u jednoj godini službe. Rezultati su prikazani za promjene indeksa sigurnosti i vjerojatnosti oštećenja.

Za razliku od općeprihvaćenih podataka za veliki broj uzoraka čelika različitog podrijetla (srednja vrijednost odstupanja od nominalne granice razvlačenja iznosi 1.14 i koeficijenta varijacije 0.15), u proračunu pouzdanosti se za izgrađeni brod koriste podaci ispitivanja ugrađenih materijala na osnovi uzoraka pribavljenih za brod iz primjera u ovom radu u fazi proizvodnje trupa u brodogradilištu i ispitanih u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku FSB-a.

Za ugrađene materijale (AH 32 i AH 36) su utvrđena odstupanja od 10 % (Tablice 2-3 i 2-4) tako da je  $\chi_u=1.10$ , a utjecaj koeficijenta varijacije se utvrđuje parametarskom analizom u rasponu od 0.01 do 0.20.

### 7.7.1 Parametarska analiza za 30 godina službe

U Tablicama 7-25 i 7-26 je prikazana parametarska analiza za nominalni materijal ( $\chi_u=1.14$ ) za BL (pregib) i FL (progib) u 30 godina službe.

**Tablica 7-25 Rezultati za BL na temelju  $\chi_u=1.14$  - nominalni materijal; 30 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{\text{FOSM}}$	$\beta_{\text{AFORM}}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
1.14	0.01	10.403	5.891	0.999999998	1.92E-09
1.14	0.05	7.759	5.679	0.999999993	6.77E-09
1.14	0.10	5.022	5.091	0.999999822	1.78E-07
<b>1.14</b>	<b>0.15</b>	<b>3.580</b>	<b>4.315</b>	<b>0.999992020</b>	<b>7.98E-06</b>
1.14	0.20	2.755	3.587	0.999832748	1.67E-04



**Tablica 7-26 Rezultati za FL na temelju  $\chi_u=1.14$  - nominalni materijal; 30 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
1.14	0.01	4.675	3.617	0.999850981	1.49E-04
1.14	0.05	3.995	3.434	0.999702628	2.97E-04
1.14	0.10	2.943	2.958	0.998451789	1.55E-03
<b>1.14</b>	<b>0.15</b>	<b>2.217</b>	<b>2.432</b>	<b>0.992492146</b>	<b>7.51E-03</b>
1.14	0.20	1.750	1.995	0.976978560	2.30E-02

U Tablicama 7-27 i 7-28 je prikazana parametarska analiza za stvarni materijal ( $\chi_u=1.10$ ) za BL (pregib) i FL (progib) u 30 godina službe.

**Tablica 7-27 Rezultati za BL na temelju  $\chi_u=1.10$  - stvarni materijal; 30 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
<b>1.10</b>	<b>0.01</b>	<b>9.775</b>	<b>5.694</b>	<b>0.999999994</b>	<b>6.20E-09</b>
<b>1.10</b>	0.05	7.401	5.484	0.999999979	2.08E-08
<b>1.10</b>	0.10	4.845	4.903	0.999999528	4.72E-07
<b>1.10</b>	0.15	3.467	4.140	0.999982635	1.74E-05
<b>1.10</b>	0.20	2.673	3.436	0.999704815	2.95E-04

**Tablica 7-28 Rezultati za FL na temelju  $\chi_u=1.10$  - stvarni materijal; 30 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
<b>1.10</b>	<b>0.01</b>	<b>4.242</b>	<b>3.383</b>	<b>0.999641507</b>	<b>3.58E-04</b>
<b>1.10</b>	0.05	3.659	3.203	0.999319980	6.80E-04
<b>1.10</b>	0.10	2.727	2.746	0.996983662	3.02E-03
<b>1.10</b>	0.15	2.067	2.252	0.987838864	1.22E-02
<b>1.10</b>	0.20	1.636	1.844	0.967408430	3.26E-02

U Tablicama 7-29 i 7-30 su prikazani izračunati združeni indeksi sigurnosti za nominalni i stvarni materijal; za FL i BL u 30 godina službe.

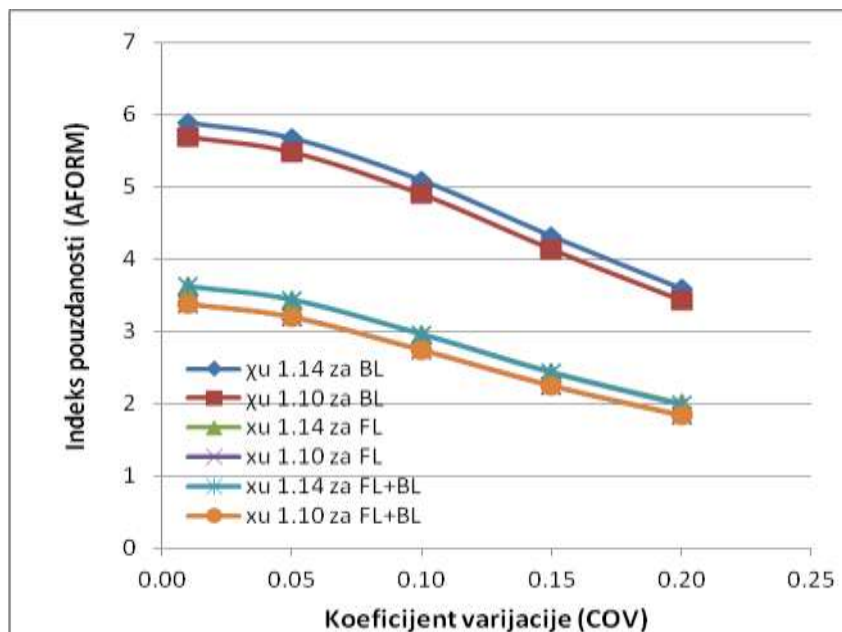
**Tablica 7-29 Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju  $\chi_u=1.14$  - nominalni materijal**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije COV	$\beta_{FL}$	$\beta_{BL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fFL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fBL}$	$\beta_{FL} + \beta_{BL}$	$p_{fFL} + p_{fBL}$
1.14	0.01	3.617	5.891	1.49E-04	1.92E-09	3.617	1.49E-04
1.14	0.05	3.434	5.679	2.97E-04	6.77E-09	3.434	2.97E-04
1.14	0.10	2.958	5.091	1.55E-03	1.78E-07	2.958	1.55E-03
1.14	0.15	<b>2.432</b>	<b>4.315</b>	<b>7.51E-03</b>	<b>7.98E-06</b>	<b>2.432</b>	<b>7.52E-03</b>
1.14	0.20	1.995	3.587	2.30E-02	1.67E-04	1.992	2.32E-02

**Tablica 7-30 Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju  $\chi_u=1.10$  - stvarni materijal**

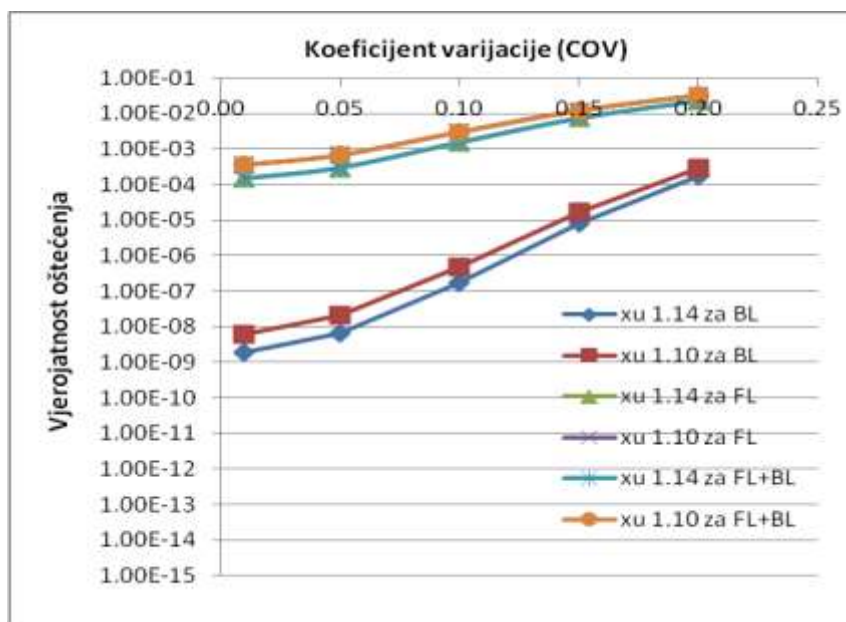
$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije COV	$\beta_{FL}$	$\beta_{BL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fFL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fBL}$	$\beta_{FL} + \beta_{BL}$	$p_{fFL} + p_{fBL}$
1.10	0.01	<b>3.383</b>	<b>5.694</b>	<b>3.58E-04</b>	<b>6.20E-09</b>	<b>3.383</b>	<b>3.58E-04</b>
1.10	0.05	3.203	5.484	6.80E-04	2.08E-08	3.203	6.80E-04
1.10	0.10	2.746	4.903	3.02E-03	4.72E-07	2.746	3.02E-03
1.10	0.15	2.252	4.140	1.22E-02	1.74E-05	2.251	1.22E-02
1.10	0.20	1.844	3.436	3.26E-02	2.95E-04	1.840	3.29E-02

Na Slici 7-5 je prikazan dijagram dobiven na osnovi Tablica 7-29 i 7-30 koji pokazuje ovisnost indeksa sigurnosti ( $\beta_{AFORM}$ ) o koeficijentu varijacije za nominalni i stvarni materijal; za FL i BL u 30 godina službe.



Slika 7-5 Zajednički dijagram  $\beta_{AFORM}$  – COV za FL, BL i FL+BL

Na Slici 7-6 je prikazan dijagram dobiven na osnovi Tablica 7-29 i 7-30 koji pokazuje ovisnost vjerojatnosti oštećenja ( $p_f$ ) o koeficijentu varijacije za nominalni i stvarni materijal; za FL i BL u 30 godina službe.



Slika 7-6 Zajednički dijagram  $p_f$  – COV za FL, BL i FL+BL

### 7.7.2 Parametarska analiza za jednu godinu službe

U Tablicama 7-31 i 7-32 je prikazana parametarska analiza za nominalni materijal ( $\chi_u=1.14$ ) za BL (pregib) i FL (progib) u jednoj godini službe.

**Tablica 7-31 Rezultati za BL na temelju  $\chi_u=1.14$  - nominalni materijal; 1 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
1.14	0.01	19.414	9.159	1.000000000	0.00E+00
1.14	0.05	11.735	8.126	1.000000000	0.00E+00
1.14	0.10	6.794	7.195	1.000000000	3.12E-13
<b>1.14</b>	<b>0.15</b>	<b>4.680</b>	<b>6.267</b>	<b>1.000000000</b>	<b>1.84E-10</b>
1.14	0.20	3.552	5.352	0.999999957	4.35E-08

**Tablica 7-32 Rezultati za FL na temelju  $\chi_u=1.14$  - nominalni materijal; 1 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
1.14	0.01	11.340	6.329	1.000000000	1.23E-10
1.14	0.05	8.375	5.895	0.999999998	1.87E-09
1.14	0.10	5.383	5.350	0.999999956	4.40E-08
<b>1.14</b>	<b>0.15</b>	<b>3.827</b>	<b>4.622</b>	<b>0.999998100</b>	<b>1.90E-06</b>
1.14	0.20	2.942	3.894	0.999950698	4.93E-05

U Tablicama 7-33 i 7-34 je prikazana parametarska analiza za stvarni materijal ( $\chi_u=1.10$ ) za BL (pregib) i FL (progib) u jednoj godini službe.

**Tablica 7-33 Rezultati za BL na temelju  $\chi_u=1.10$  - stvarni materijal; 1 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
<b>1.10</b>	<b>0.01</b>	<b>18.516</b>	<b>8.973</b>	<b>1.000000000</b>	<b>0.00E+00</b>
<b>1.10</b>	0.05	11.428	7.928	1.000000000	0.00E+00
<b>1.10</b>	0.10	6.671	6.997	1.000000000	1.31E-12
<b>1.10</b>	0.15	4.605	6.110	1.000000000	4.98E-10
<b>1.10</b>	0.20	3.498	5.207	0.999999904	9.60E-08

**Tablica 7-34 Rezultati za FL na temelju  $\chi_u=1.10$  - stvarni materijal; 1 godina**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije (COV)	$\beta_{FOSM}$	$\beta_{AFORM}$	Pouzdanost (R)	Vjerojatnost oštećenja ( $p_f$ )
<b>1.10</b>	<b>0.01</b>	<b>10.699</b>	<b>5.905</b>	<b>0.999999998</b>	<b>1.76E-09</b>
<b>1.10</b>	0.05	8.024	5.711	0.999999994	5.62E-09
<b>1.10</b>	0.10	5.215	5.174	0.999999885	1.15E-07
<b>1.10</b>	0.15	3.723	4.455	0.999995805	4.19E-06
<b>1.10</b>	0.20	2.867	3.748	0.999910875	8.91E-05

U Tablicama 7-35 i 7-36 su prikazani izračunati združeni indeksi sigurnosti za nominalni i stvarni materijal; za FL i BL u jednoj godini službe.

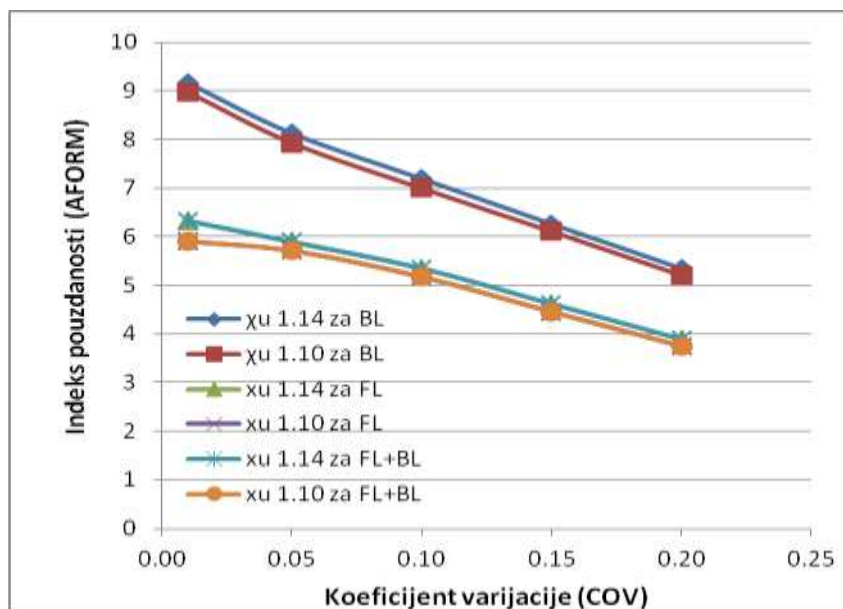
**Tablica 7-35 Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju  $\chi_u=1.14$  - nominalni materijal**

$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije COV	$\beta_{FL}$	$\beta_{BL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fFL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fBL}$	$\beta_{FL} + \beta_{BL}$	$p_{fFL} + p_{fBL}$
1.14	0.01	6.329	9.159	1.23E-10	0.00E+00	6.329	1.23E-10
1.14	0.05	5.895	8.126	1.87E-09	0.00E+00	5.895	1.87E-09
1.14	0.10	5.350	7.195	4.40E-08	3.12E-13	5.350	4.40E-08
<b>1.14</b>	<b>0.15</b>	<b>4.622</b>	<b>6.267</b>	<b>1.90E-06</b>	<b>1.84E-10</b>	<b>4.622</b>	<b>1.90E-06</b>
1.14	0.20	3.984	5.352	3.39E-05	4.35E-08	3.984	3.39E-05

**Tablica 7-36 Združeni indeksi sigurnosti za FL i BL na temelju  $\chi_u=1.10$  - stvarni materijal**

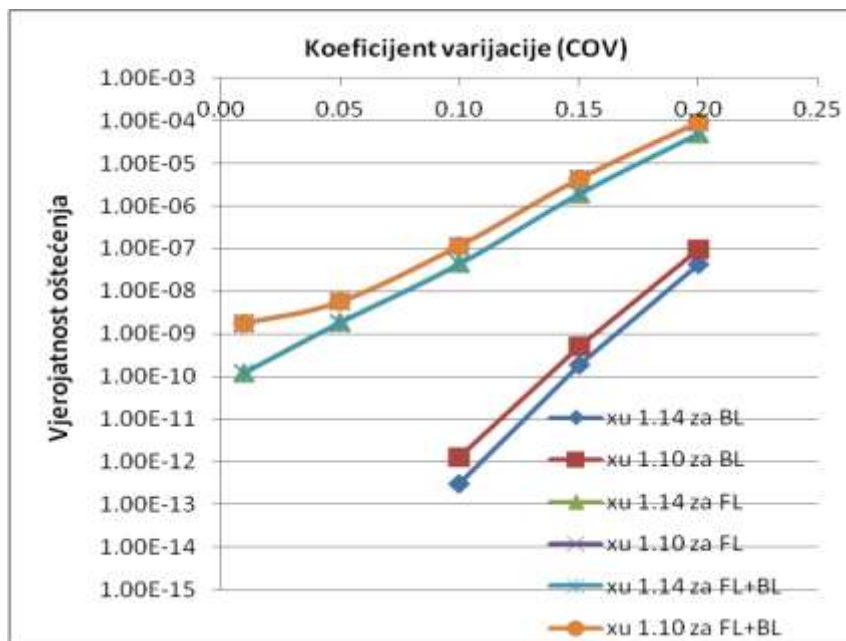
$\chi_u$ - srednja vrijednost	Koeficijent varijacije COV	$\beta_{FL}$	$\beta_{BL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fFL}$	Vjerojatnost oštećenja $p_{fBL}$	$\beta_{FL} + \beta_{BL}$	$p_{fFL} + p_{fBL}$
<b>1.10</b>	<b>0.01</b>	<b>5.905</b>	<b>8.973</b>	<b>1.76E-09</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>5.905</b>	<b>1.76E-09</b>
1.10	0.05	5.711	7.928	5.62E-09	0.00E+00	5.711	5.62E-09
1.10	0.10	5.174	6.997	1.15E-07	1.31E-12	5.174	1.15E-07
1.10	0.15	4.455	6.110	4.19E-06	4.98E-10	4.455	4.20E-06
1.10	0.20	3.748	5.207	8.91E-05	9.60E-08	3.748	8.92E-05

Na Slici 7-7 je prikazan dijagram dobiven na osnovi Tablica 7-35 i 7-36 koji pokazuje ovisnost indeksa sigurnosti ( $\beta_{AFORM}$ ) o koeficijentu varijacije za nominalni i stvarni materijal; za FL i BL u jednoj godini službe.



**Slika 7-7 Zajednički dijagram  $\beta_{AFORM}$  – COV za FL, BL i FL+BL**

Na Slici 7-8 je prikazan dijagram dobiven na osnovi Tablica 7-35 i 7-36 koji pokazuje ovisnost vjerojatnosti oštećenja ( $p_f$ ) o koeficijentu varijacije za nominalni i stvarni materijal; za FL i BL u jednoj godini službe.



Slika 7-8 Zajednički dijagram  $p_f$  – COV za FL, BL i FL+BL

Parametarska analiza ukazuje na velike promjene indeksa sigurnosti i još veće promjene vjerojatnosti oštećenja kao posljedice promjena statističkih svojstava materijala. Osobito se primjećuje veliki utjecaj rasipanja vrijednosti granice razvlačenja materijala. Ova primjedba neposredno ukazuje da kontrola materijala u fazi gradnje može značajno povećati pouzdanost proračuna granične čvrstoće brodskog trupa.

## 8 Zaključak

Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Ona su, kao i sva ostala svojstva materijala, posljedica strukturnog stanja materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom. Da bi se dobio uvid u pravu čvrstoću brodskog trupa potrebno je ustanoviti i stvarna svojstva materijala ugrađenog u brod. Ideja ovog rada je bila utvrđivanje utjecaja stvarnih svojstava ugrađenih materijala na graničnu čvrstoću i pouzdanost izgrađenog broda.

Na temelju ispitivanja provedenih u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku potvrđena je polazna pretpostavka o razlikama stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika u odnosu na nominalne podatke koji se koriste u projektiranju. Za čelike povišene čvrstoće AH 32 i AH 36 od kojih je izgrađen razmatrani brod odstupanje granice razvlačenja iznosi otprilike 10 %.

Usporedba rezultata dobivenih računalnim programom MARS 2000 daje jedan sasvim općeniti uvid u povećanje uzdužne i granične čvrstoće. Tako je na primjeru razmatranog broda za rasute terete izgrađenog u Hrvatskoj utvrđeno povećanje granične čvrstoće s obzirom na veću stvarnu čvrstoću ugrađenih materijala od oko 10%.

Analiza pouzdanosti je provedena s ciljem utvrđivanja utjecaja materijala na mjere pouzdanosti. Osim toga, provedeni su proračuni statističkih svojstava opterećenja rodskog trupa na mirnoj vodi i na valovima. Korištenjem naprednih metoda pouzdanosti s materijalima poznatih svojstava utvrđen je značajni porast pouzdanosti u službi broda u odnosu na proračune pouzdanosti s općim statističkim podacima o brodograđevnim materijalima kako se primjenjuju u dostupnoj literaturi. Parametarskom analizom utjecaja stvarnih svojstava ugrađenih materijala pokazano je da se kontrolom kvalitete materijala u brodogradilištu i utvrđivanjem statističkih podataka o njihovoj razdiobi može jako utjecati na pouzdanost u pogledu određivanja granične čvrstoće.



## 9 Literatura

- [1] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1998.
- [2] Žiha, K.: Konstrukcija broda 2, Digitalni udžbenik, 2003.
- [3] Žiha, K., Parunov, J., Tušek, B.: Granična čvrstoća broskog trupa, članak iz časopisa Brodogradnja, br. 58, str. 29-41, 2007.
- [4] Dupor, N.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [5] Flego, F.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [6] El-Saleh, A.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [7] Blagojević, B.: Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2005.
- [8] Žiha, K., Parunov, J., Čorak, M.: Preispitivanje zajedničkih propisa za procjenu granične čvrstoće broskog trupa, članak za SORTU, 2010.
- [9] Hadžić, N., Čorak, M., Parunov, J., Žiha, K.: Računske neizvjesnosti modeliranja pouzdanosti broskog trupa, članak za SORTU, 2010.
- [10] Žiha, K.: Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1989.
- [11] Guedes Soares, C., Teixeira, A. P.: Structural reliability of two bulk carrier design, članak u Marine Structures 13, 2000.